Проф. Ф. И. ХОЛУЯНОВ

ТРАНСФОРМАТОРЫ

ОДНОФАЗНОГО И ТРЕХФАЗНОГО ТОКА



ОНТИ ЭНЕРГОИЗДАТ 1934

Проф. Ф. И. ХОЛУЯНОВ

ТРАНСФОРМАТОРЫ

ОДНОФАЗНОГО И ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

ИЗДАНИЕ ЧЕТВЕРТОЕ
ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

*Утверждено Комитетом
по высшему техническому образованию
при ЦИК СССР
в качестве учебника для ВТУЗов*



ОНТИ ★ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО ★ 1934
ЛЕНИНГРАД МОСКВА

Автор книги—профессор Электротехнического института им. В. Ульянова-Ленина в Ленинграде. Книга содержит краткую теорию явлений в однофазных и трехфазных трансформаторах и описание их конструкций. Материал дается в объеме, прорабатываемом в электротехнических ВТУЗах. При некоторых сокращениях тот же материал может быть изучаем и в электротехникумах.

ПРЕДИСЛОВИЕ.

Трансформатором в электротехнике называется аппарат, преобразующий электрическую энергию переменного тока в электрическую же энергию переменного тока. В этом аппарате нет непрерывно вращающихся частей. Поэтому трансформатор не является машиной в обычном смысле этого слова; но так как в трансформаторе все же имеет место преобразование энергии и притом это преобразование, как и в обычных электрических машинах, происходит при посредстве магнитного потока, то он весьма близко к ним подходит по явлениям, в нем происходящим. На этом основании курс трансформаторов составляет неотъемлемую часть общего курса электрических машин.

Трансформатор является необходимейшим элементом электрической установки переменного тока. Он облегчает передачу энергии на далекие расстояния, он же облегчает ее распределение между крупными и самыми мелкими приемниками. Благодаря применению трансформатора, позволяющего получать переменный ток при любом напряжении, облегчается производство электрических машин переменного тока, которые не могут работать при слишком высоких напряжениях, а также электрической аппаратуры и приемников электрической энергии. Только благодаря трансформатору переменный ток получил широчайшее распространение, отодвинув постоянный ток, не имеющий своего трансформатора, на второе и относительно весьма скромное место.

Трансформаторы, как и электрические машины, характеризуются, в основном, мощностью и напряжением. Диапазон мощностей и напряжений современных трансформаторов весьма широк. Имеются трансформаторы мощностью 0,5 VA, но имеются трансформаторы мощностью и в 100 000 kVA в одной единице. Точно так же существуют трансформаторы с напряжением 2—3 V, но существуют трансформаторы с напряжением 1 миллион вольт или 1000 kV. Последнее напряжение имеется у трансформаторов лабораторного типа. Наивысшие напряжения промышленных трансформаторов — 110 kV и 220 kV. Причины ограничения предельного напряжения промышленных трансформаторов кроются не в производстве трансформаторов, а в устройстве линий передачи и высоковольтной аппаратуры. Точно так же причины ограничения мощности трансформатора величиною 100 000 kVA в одной единице лежат не в трансформаторе, а в условиях железнодорожного транспорта. Размеры мощного трансформатора (свыше 100 000 kVA) при высоком напряжении получаются настолько значительными, что трансформатор с его баком и выводами (изолято-

*

рами) уже не вмещается в железнодорожный габарит даже при специально для него построенной тележке.

Рост мощности центральных электрических станций, а также проблема единой высоковольтной сети выдвигает мощное трансформаторостроение и у нас, в СССР. В настоящее время электрозавод в Москве уже строит трансформаторы (однофазные) мощностью 20 000 kVA с напряжением 220/110 kV. Ведется подготовка к производству мощных трансформаторов высокого напряжения с применением собственных, неимпортных, изоляционных материалов.

Настоящая книга имеет целью дать основные сведения об устройстве и работе трансформаторов однофазного и трехфазного тока. Она является одним из звеньев серии руководств по электрическим машинам, которые предназначаются для проработки учащимися в электротехнических ВТУЗах и техникумах — очных и заочных.

Инж. А. В. Трамбицкому, просмотревшему рукопись и сделавшему ряд указаний, приношу глубокую благодарность.

ГЛАВА ПЕРВАЯ.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И УСТРОЙСТВА ОДНОФАЗНЫХ И ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ.

§ 1. Работа однофазного трансформатора вхолостую.

Трансформаторами в электротехнике называют такие аппараты, в которых электрическая энергия переменного тока от одной неподвижной катушки из проводника передается другой неподвижной же катушке из проводника, не связанной с первой электрически. Звеном, передающим энергию от одной катушки другой, является магнитный поток, сцепляющийся с обеими катушками и непрерывно меняющийся по величине и по направлению.

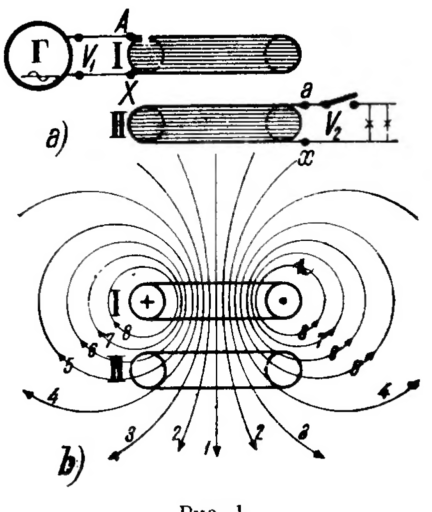


Рис. 1.

На рис. 1a изображен простейший трансформатор, состоящий из двух катушек *I* и *II*, расположенных коаксиально одна над другой. К катушке *I* подводится переменный ток от генератора переменного тока *Г*; эта катушка называется первичной катушкой или первичной обмоткой. С катушкою *II*, называемой вторичной катушкой или вторичной обмоткой, соединяется цепь с приемниками электрической энергии.

Действие трансформатора заключается в следующем. При прохождении тока в первичной катушке *I* ею создается магнитное поле, силовые линии которого пронизывают не только создавшую их катушку, но частично и вторичную катушку *II*. Примерная картина распределения силовых линий, создаваемых первичною катушкою, изображена на рис. 1b. Как видно из рисунка, все силовые линии замыкаются вокруг проводников катушки *I*, но часть их (на рис. 1b силовые линии *1*, *2*, *3*, *4*) замыкаются также вокруг проводников катушки *II*. Таким образом катушка *II* является магнитно связанной с катушкою *I* при посредстве магнитных силовых линий. Степень магнитной связи катушек *I* и *II*, при коаксиальном располо-

жении их, зависит от расстояния между ними: чем дальше катушки друг от друга, тем меньше магнитная связь между ними, ибо тем меньше силовых линий катушки *I* сцепляется с катушкою *II*. Так как через катушку *I* проходит, как мы предполагаем, переменный ток, т. е. ток, меняющийся во времени по какому-то закону, например по закону синуса, то и магнитное поле, им создаваемое, также будет меняться во времени по тому же закону. Например, когда ток в катушке *I* проходит через наибольшее значение, то и магнитный поток, им создаваемый, также проходит через наибольшее значение; когда ток в катушке *I* проходит через нуль, меняя свое направление, то и магнитный поток проходит через нуль, также меняя свое направление. В результате изменения тока в катушке *I* обе катушки *I* и *II* пронизываются магнитным потоком, непрерывно меняющим свою величину и свое направление. Согласно основному закону электромагнитной индукции при всяком изменении пронизывающего катушку магнитного потока в катушке индуктируется переменная электродвижущая сила. В нашем случае в катушке *I* индуктируется электродвижущая сила самоиндукции, а в катушке *II* индуктируется электродвижущая сила взаимоиндукции.

Если концы катушки *II* соединить с цепью приемников электрической энергии (см. рис. 1а), то в этой цепи появится ток; следовательно приемники получат электрическую энергию. В то же время к катушке *I* от генератора направится энергия, почти равная энергии, отдаваемой в цепь катушкой *II*. Таким образом электрическая энергия от одной катушки будет передаваться в цепь второй катушки, совершенно не связанной с первой катушкой гальванически (металлически). Средством передачи энергии в этом случае является только переменный магнитный поток.

Изображенный на рис. 1а трансформатор весьма несовершенен, ибо между первичной катушкой *I* и вторичной катушкой *II* магнитная связь невелика.

Магнитная связь двух обмоток, вообще говоря, оценивается отношением магнитного потока, сцепляющегося с обеими обмотками, к потоку, создаваемому одной катушкой.

Из рис. 1b видно, что только часть силовых линий катушки *I* замыкается вокруг катушки *II*. Другая часть силовых линий (на рис. 1b— линии *6, 7, 8*) замыкается только вокруг катушки *I*. Эти силовые линии в передаче электрической энергии от первой катушки ко второй совершенно не участвуют, они образуют так называемое поле рассеяния.

> **Для того чтобы увеличить магнитную связь между первичной и вторичной обмотками и одновременно уменьшить магнитное сопротивление для прохождения магнитного потока, обмотки технических трансформаторов располагают на совершенно замкнутых железных сердечниках.**

Первым примером выполнения трансформаторов может служить схематически изображенный на рис. 2 однофазный трансформатор так называемого стержневого типа. У него первичные и вторичные катушки c_1 и c_2 расположены на железных стержнях $a — a$, соединенных с торцов железными же накладками $b — b$, называемыми ярмами. Таким образом два стержня a, a и два ярма b, b образуют замкнутое железное кольцо, в котором и проходит магнитный поток, сцепляющийся с первичной и вторичной обмотками. Это железное кольцо называется сердечником трансформатора.

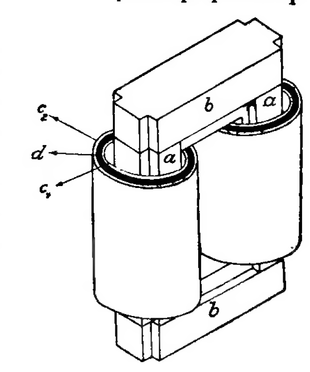
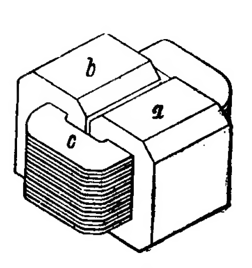


Рис. 2.

Вторым примером выполнения трансформаторов может служить схематически изображенный на рис. 3 однофазный трансформатор так называемого броневого типа. У этого трансформатора первичные и вторичные обмотки c, состоящие каждая из ряда плоских катушек, расположены на сердечнике, образуемом двумя стержнями двух железных колец a и b. Кольца a и b, окружая обмотки, покрывают их почти целиком как бы бронею; поэтому описываемый трансформатор и называется броневым. Магнитный поток, проходящий внутри обмоток c, разбивается на две равные части, замыкающиеся каждое в своем железном кольце.



Рс. 3·

Применением железных замкнутых магнитных цепей у трансформаторов добиваются значительного снижения потока рассеяния. У таких трансформаторов потоки, сцепляющиеся с первичною и вторичною обмотками, почти равны друг другу. Предполагая, что первичная и вторичная обмотки пронизываются одним и тем же магнитным потоком, мы можем на основании общего закона индукции для мгновенных значений электродвижущих сил обмоток написать выражения:

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi_t}{dt} \cdot 10^{-8} \text{ вольт};$$

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi_t}{dt} \cdot 10^{-8} \text{ вольт}.$$

В этих выражениях w_1 и w_2 — числа витков первичной и вторичной обмоток, а $d\Phi_t$ — величина изменения пронизывающего катушки магнитного потока за элемент времени dt; следовательно $\frac{d\Phi_t}{dt}$ есть скорость изменения магнитного потока.

Из последних выражений можно получить следующее отношение:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{w_1}{w_2};$$

т. е. индиктируемые в первичной и вторичной катушках *I* и *II* мгновенные электродвижущие силы относятся друг к другу так же, как числа витков катушек. Последнее заключение справедливо не только по отношению к мгновенным значениям электродвижущих сил, но и к их наибольшим и действующим значениям.

Электродвижущая сила, индуктируемая в первичной катушке, будучи электродвижущей силой самоиндукции, почти целиком уравновешивает приложенное к той же катушке напряжение (см. далее). Если через E_1 и V_1 обозначить действующие значения электродвижущей силы первичной катушки и приложенного к ней напряжения, то можно написать:

$$E_1 \cong V_1.$$

Электродвижущая сила, индуктируемая во вторичной катушке, равна в рассматриваемом случае напряжению на концах этой катушки. Если, аналогично предыдущему, через E_2 и V_2 обозначить действующие значения электродвижущей силы вторичной катушки и напряжения на ее концах, то можно написать:

$$E_2 \cong V_2.$$

Следовательно, приложив к одной катушке трансформатора некоторое напряжение, можно на концах другой катушки получить любое напряжение, стоит только взять подходящее отношение между числами витков этих катушек. В этом и заключается основное свойство трансформатора.

Отношение числа витков первичной обмотки к числу витков вторичной обмотки называется **коэфициентом трансформации** трансформатора. Коэфициент трансформации мы будем обозначать в дальнейшем буквою u.

Следовательно можно написать:

$$\frac{E_1}{E_2} \cong \frac{V_1}{V_2} = \frac{w_1}{w_2} = u,$$

т. е.

> **отношение электродвижущих сил первичной и вторичной обмоток трансформатора равно коэфициенту трансформации.**

Трансформатор, у которого коэфициент трансформации меньше единицы, называется **повышающим трансформатором**, ибо у него напряжение вторичной обмотки, или так называемое вторичное напряжение, больше напряжения первичной обмотки, или так называемого первичного напряжения. Трансформатор, у которого коэфициент трансформации больше единицы, называется **понижающим трансформатором**, ибо у него вторичное напряжение меньше первичного.

Величины коэфициентов трансформации по ОСТу 4815 для трансформаторов разных мощностей см. в конце книги „Приложения".

§ 2. Работа однофазного трансформатора под нагрузкою.

При холостой работе трансформатора магнитный поток создается током первичной обмотки или, вернее, магнитодвижущей силой первичной обмотки, равной $0{,}4\pi I_0 w_1$, где I_0 — ток в обмотке, а w_1 — число ее витков. Так как магнитная цепь трансформатора выполняется из железа и потому имеет небольшое магнитное сопротивление, а число витков первичной обмотки берется обычно большим, то ток холостой работы трансформатора невелик; он составляет 5—10% нормального (см. далее).

Если замкнуть вторичную обмотку на какое-либо сопротивление, то с появлением тока во вторичной обмотке появится и магнитодвижущая сила этой обмотки.

> **Согласно закону Ленца магнитодвижущая сила вторичной обмотки действует против магнитодвижущей силы первичной обмотки.**

Казалось бы, что магнитный поток в этом случае должен уменьшаться, но если к первичной обмотке подведено постоянное по величине напряжение, то уменьшения магнитного потока почти не произойдет. В самом деле, электродвижущая сила, индуктируемая в первичной обмотке, при нагрузке трансформатора почти равна приложенному напряжению (см. далее, § 23). Эта электродвижущая сила пропорциональна магнитному потоку. Следовательно, если первичное напряжение постоянно по величине, то и электродвижущая сила при нагрузке должна остаться почти той же, какой она была при холостой работе трансформатора. Это обстоятельство имеет следствием почти полное постоянство магнитного потока при любой нагрузке.

Итак,

> **при постоянном по величине первичном напряжении магнитный поток трансформатора почти не меняется с изменением нагрузки и может быть принят равным магнитному потоку при холостой работе.**

Магнитный поток трансформатора может сохранить свою величину при нагрузке лишь потому, что с появлением тока во вторичной обмотке увеличивается и ток в первичной обмотке и притом настолько, что разность магнитодвижущих сил или ампер-

витков первичной и вторичной обмоток остается почти равной магнитодвижущей силе или ампервиткам при холостой работе. Таким образом появление во вторичной обмотке размагничивающей магнитодвижущей силы или ампервитков сопровождается автоматическим увеличением магнитодвижущей силы первичной обмотки.

Так как для создания магнитного потока трансформатора требуется, как было указано выше, небольшая магнитодвижущая сила, то можно сказать, что увеличение вторичной магнитодвижущей силы сопровождается почти таким же по величине увеличением первичной магнитодвижущей силы. Это значит, что если при каком-либо токе во вторичной обмотке I_2 магнитодвижущая сила ее равна $0{,}4\pi I_2 w_2$, где w_2 — число витков вторичной обмотки, то можно сказать, что с большим приближением она равна магнитодвижущей силе первичной обмотки $0{,}4\pi I_1 w_1$, где I_1 — ток в первичной обмотке при токе I_2 во вторичной обмотке, а w_1 — число витков первичной обмотки.

Следовательно, можно написать:

$$0{,}4\pi I_2 w_2 = 0{,}4\pi I_1 w_1,$$

или

$$I_2 w_2 = I_1 w_1.$$

Из последнего равенства получается вторая основная характеристика трансформатора, а именно, отношение:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{w_2}{w_1} = \frac{1}{u},$$

где u — коэфициент трансформации.

Таким образом

отношение токов первичной и вторичной обмоток трансформатора равно единице, деленной на его коэфициент трансформации.

Итак, основные характеристики трансформатора заключаются в отношениях:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = u;$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{w_2}{w_1} = \frac{1}{u}.$$

Если перемножить левые части отношений между собой и правые части между собой, то получим

$$\frac{I_1 E_1}{I_2 E_2} = 1,$$

или

$$I_1 E_1 = I_2 E_2.$$

Последнее равенство дает третью характеристику трансформатора, которую можно выразить словами так:

отдаваемая вторичной обмоткой трансформатора мощность в вольт-амперах, почти равна мощности, подводимой к первичной обмотке также в вольт-амперах.

Если пренебречь потерями энергии в меди обмоток и в железе сердечника трансформатора, то можно сказать, что вся мощность, подводимая к первичной обмотке трансформатора от источника энергии, передается вторичной обмотке его, причем передатчиком служит магнитный поток. В этом отношении трансформатор можно уподобить механической зубчатой передаче, почему коэфициент трансформации называется иногда передаточным числом.

§ 3. Принцип действия и устройства трехфазных трансформаторов.

Трехфазный ток можно трансформировать тремя совершенно отдельными однофазными трансформаторами (см. дальше). В этом случае обмотки всех трех фаз магнитно не связаны друг с другом: каждая фаза имеет свою магнитную цепь. Но тот же трехфазный ток можно трансформировать и одним трехфазным трансформатором, у которого обмотки всех трех фаз магнитно связаны между собою, так как имеют общую магнитную цепь.

Чтобы уяснить себе принцип действия и устройства трехфазного трансформатора, представим себе три однофазных трансформатора, приставленных один к другому так, что три стержня их образуют один общий центральный стержень (рис. 4). На каждом из остальных трех стержней наложены первичные и вторичные обмотки (на рис. 4 вторичные обмотки не изображены).

Предположим, что первичные катушки всех стержней совершенно одинаковы и намотаны в одном направлении (на рис. 4 первичные катушки намотаны по часовой стрелке, если смотреть на них сверху). Соединим все верхние концы катушек в нейтраль O, а нижние концы катушек подведем к трем зажимам трехфазной сети. Токи в катушках создадут переменные во времени магнитные потоки, которые будут замыкаться каждый в своей магнитной цепи. В центральном составном стержне магнитные потоки сложатся и в сумме дадут нуль, ибо эти потоки создаются симметричными трехфазными токами, относительно которых мы знаем, что сумма мгновенных значений их равна нулю в любой момент времени. Например, если бы в катушке AX ток I_1 был наибольший и проходил в указанном на рис. 4 направлении, то магнитный поток был бы равен наибольшему своему значению Φ и был направлен в центральном составном стержне сверху вниз. В двух других ка-

тушках BY и CZ токи I_2 и I_3 в тот же момент времени равны половине наибольшего тока и имеют обратное направление по отношению к току в катушке AX (таково свойство трехфазных токов). По этой причине в стержнях катушек BY и CZ магнитные потоки будут равны половине наибольшего потока и в центральном составном стержне будут иметь обратное направление по отношению к потоку катушки AX. Сумма потоков в рассматриваемый момент равна нулю. То же самое имеет место и для любого другого момента. Отсутствие потока в центральном стержне не означает отсутствия потоков в остальных стержнях. Если бы мы уничтожили центральный стержень, а верхние и нижние ярма соединили в общие ярма (см. рис. 5), то поток катушки AX нашел бы себе путь через сердечники катушек BY и CZ, причем магнитодвижущие силы этих катушек сложились бы с магнитодвижущей силой катушки AX. В таком случае мы получили бы трехфазный трансформатор с общей магнитною цепью всех трех фаз.

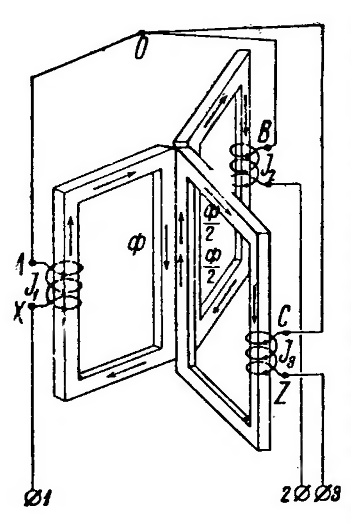


Рис. 4.

Так как токи в катушках смещены по фазе на 1/3 периода, то и создаваемые ими магнитные потоки также смещены во времени на 1/3 периода, т. е. наибольшие значения магнитных потоков в стержнях катушек следуют друг за другом через 1/3 периода. Следствием сдвига по фазе магнитных потоков в сердечниках на 1/3 периода является такой же сдвиг по фазе и электродвижущих сил, индуктируемых как в первичных, так и во вторичных катушках, наложенных на стержнях. Электродвижущие силы первичных катушек почти уравновешивают приложенное трехфазное напряжение. Электродвижущие силы вторичных катушек при правильном соединении концов катушек дают трехфазное вторичное напряжение, которое подается во вторичную цепь.

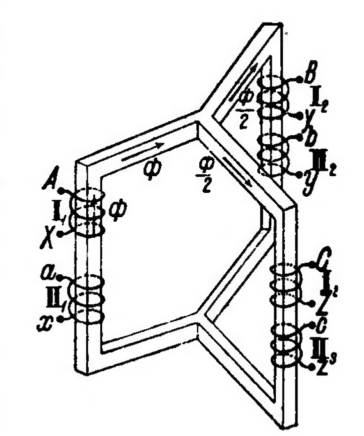


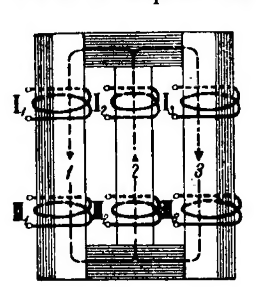
Рис. 5.

В отношении конструкции магнитной цепи трехфазные трансформаторы, как и однофазные, разделяются на стержневые и броневые. Стержневые трансформаторы подразделяются на: а) трансформаторы с симметричной магнитной цепью и b) трансформаторы с несимметричной магнитной цепью. На рис. 6 схематически изображен стержневой трансформатор с симметричной магнитной цепью, а на рис. 7 изображен стержневой трансформатор с несимметричной магнитной цепью. Как видно из рисунков, оба трансформатора состоят из трех железных стерж-

ней *1*, *2* и *3*, схваченных сверху и снизу железными накладками-ярмами. На каждом стержне находятся первичная I и вторичная II катушки одной фазы.

У первого трансформатора стержни расположены по вершинам углов равностороннего треугольника; у второго трансформатора стержни расположены в одной плоскости.

Расположение стержней по вершинам углов равностороннего треугольника дает равные магнитные сопротивления для магнитных потоков всех трех фаз, так как пути прохождения этих потоков одинаковы. В самом деле, магнитные потоки трех фаз проходят каждый в отдельности через один вертикальный стержень полностью и через два других стержня по половине. На рис. 6 пунктиром изображены пути замыкания магнитного потока фазы стержня *2*. Легко видеть, что для потоков фаз стержней *1* и *3* пути замыкания их магнитных потоков совершенно одинаковы. Это значит, что у рассматриваемого трансформатора магнитные сопротивления для потоков равны между собою.



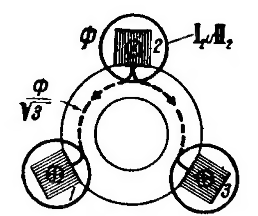


Рис. 6.

Расположение стержней в одной плоскости приводит к тому, что магнитное сопротивление для потока средней фазы (на рис. 7 для фазы стержня *2*) меньше, нежели для потоков крайних фаз (на рис. 7—для фаз стержней *1* и *3*). Действительно магнитные потоки крайних фаз проходят по несколько более длинным путям, чем поток средней фазы. Кроме того, поток крайних фаз, выйдя из своих стержней, проходит в одной половине ярма полностью, и только в другой половине (после ответвления в средний стержень) проходит его половина. Поток же средней фазы по выходе из вертикального стержня тотчас же разветвляется на две половины, и потому в обеих частях ярма проходит лишь половина потока средней фазы. Таким образом потоки крайних фаз насыщают ярмо в большей степени, чем поток средней фазы, а потому магнитное сопротивление для потоков крайних фаз больше, чем для потока средней фазы.

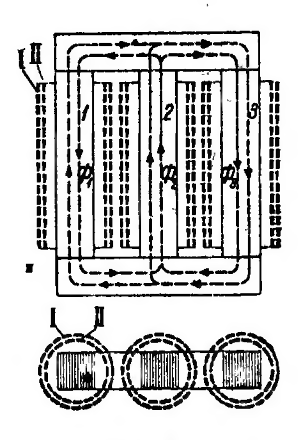


Рис. 7.

Следствием неравенства магнитных сопротивлений для потоков разных фаз трехфазного трансформатора является неравенство токов холостой работы в отдельных фазах при одном и том же фазном напряжении.

Однако при небольшой насыщенности железа ярма и хорошей сборке железа стержней это неравенство токов незначительно. Так как конструкция трансформаторов с несимметричной магнитной цепью значительно проще, чем трансформатора с симметричной магнитной цепью, то первые трансформаторы и нашли себе преимущественное применение. Трансформаторы с симметричною магнитною цепью встречаются редко.

Рассматривая рис. 6 и 7 и предполагая, что во всех трех фазах проходят токи, легко видеть, что все фазы магнитно связаны друг с другом. Это значит, что магнитодвижущие силы отдельных фаз влияют друг на друга, чего мы не имеем, когда трехфазный ток трансформируется тремя однофазными трансформаторами.

Вторую группу трехфазных трансформаторов составляют броневые трансформаторы. Броневой трансформатор можно рассматривать как бы состоящим из трех однофазных броневых трасформаторов, приставленных один к другому своими ярмами.

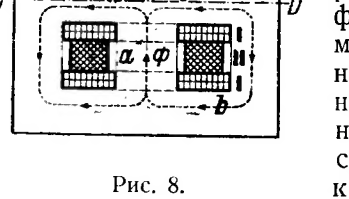


Рис. 8.

На рис. 8 схематически изображен броневой трехфазный трансформатор с вертикально расположенным внутренним стержнем. Легко видеть из рисунка, что плоскостями *AB* и *CD* он может быть разбит на три однофазных броневых трансформатора, магнитные потоки которых могут замыкаться каждый по своей магнитной цепи. Пути прохождения магнитных потоков на рис. 8 указаны пунктирными линиями. Как видно из рисунка, в средних вертикальных стержнях *a*, на которых наложены первичная I и вторичная II обмотки одной фазы, проходит полный поток, тогда как в ярмах *b-b* и боковых стенках проходит по половине потока. При одной и той же индукции сечения ярма и боковых стенок должны быть вдвое меньше сечения среднего стержня *a*.

Что касается магнитного потока в промежуточных частях *c—c*, то его величина, как мы увидим далее, зависит от способа включения средней фазы.

Броневые трансформаторы широко распространены в Америке. В Европе они встречаются значительно реже.

Главным преимуществом броневых трансформаторов перед стержневыми трансформаторами являются короткие пути замыкания магнитных потоков, а следовательно, небольшие токи холостой работы. К недостаткам броневых трансформаторов можно отнести, во-первых, малую доступность обмоток для ремонта, в виду того, что они окружены железом, и, во-вторых, худшие условия охлаждения обмотки — по той же причине. У стержневых трансформаторов обмотки почти целиком открыты и потому более доступны для осмотра и ремонта, а также и для охлаждающей среды.

§ 4. Вопросы для самопроверки.

1. Что представляет собою трансформатор?
2. На каком явлении основана работа трансформатора?
3. Из каких частей состоит трансформатор?
4. Как устроены стержневой и броневой трансформаторы?
5. Какова роль сердечника у трансформатора?
6. Что такое коэфициент трансформации?
7. Почему магнитный поток трансформатора остается почти постоянным при постоянном напряжении?
8. Первичное напряжение $V_1 = 100$ V; число витков первичной обмотки $w_1 = 100$; сколько витков должна иметь вторичная обмотка при вторичном напряжении 2000 V? Чему равен вторичный ток, если первичный ток $I_1 = 100$ A?
9. Как устроен трехфазный трансформатор стержневой и броневой?

ГЛАВА ВТОРАЯ.

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О КОНСТРУКЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ; СЕРДЕЧНИКИ ТРАНСФОРМАТОРОВ.

§ 5. Железо для сердечников.

Сердечники трансформаторов набираются из отдельных листов железа, толщиною 0,5 или 0,35 *мм*, изолированных друг от друга тонкой папиросной бумагой или лаком. Листовое железо, идущее на изготовление сердечников трансформаторов, должно обладать, во-первых, хорошей магнитной проницаемостью, чтобы намагничивающий ток был невелик, во-вторых, относительно большим удельным омическим сопротивлением, чтобы токи Фуко в нем были возможно меньше, и, в-третьих, малой задерживающей или коорцетивной силой, чтобы потери на гистерезис были невелики.

Таким условиям до известной степени удовлетворяет мягкое отожженное железо с примесью кремния, так называемое легированное железо.

В трансформаторостроении обычно применяют средне-легированное и сильно-легированное железо. Средне-легированное железо содержит около 2% кремния, а сильно-легированное — около 4%. Если сравнить легированное железо с обыкновенным динамным железом, не содержащим кремния или содержащим лишь следы кремния (до 0,1%), то можно констатировать, что средне-легированное железо при индукции $B = 18\,000$ гауссов и частоте перемагничения $f = 50$ Hz имеет потери почти на 30% меньше, чем динамное железо, хотя намагничивающие ампервитки при тех же значениях индукции и частоте у средне-легированного железа на 10—11% больше, чем у динамного железа.

Сильно-легированное железо при индукции $B = 18\,000$ гауссов и частоте перемагничения $f = 50$ Hz имеет потери почти на 50% меньшие, а намагничивающие ампервитки на 45% большие, чем динам-

ное железо. Увеличение намагничивающих ампервитков с увеличением содержания кремния в железе есть характерное влияние кремния на железо. В общесоюзном стандарте (ОСТ 377), обязательном с 1 июля 1929 г., на железо, применяемое в динамостроении и трансформаторостроении СССР, устанавливаются три марки, причем железо названо сталью, в виду наличия в нем кремния. Эти марки следующие:

a) Ст. Д — сталь листовая динамная,
b) Ст. С — сталь динамная специальная,
c) Ст. Т — сталь листовая трансформаторная.

Таким образом по общесоюзному стандарту предусматривается один сорт трансформаторной стали.

Магнитные свойства стали указанных марок определяются по стандарту следующими техническими условиями.

а) Магнитная индукция.

Магнитная индукция электротехнической стали для определенных значений намагничивающих ампервитков на 1 *см* должна быть не ниже величин, указанных в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1.

Ампер-витков на *см*	Магнитная индукция в гауссах		
	Ст. Д	Ст. С	Ст. Т
25	15 000	14 700	14 300
50	16 000	15 700	15 500
100	17 800	16 900	16 500
300	19 800	19 300	18 500

От указанных величин магнитной индукции допускаются отклонения в сторону уменьшения не более, чем в 50 гауссов (ср. с кривой намагничения трансформаторного железа, приводимой на рис. 72).

б) Потери на гистерезис и на токи Фуко.

Потери энергии в стали на гистерезис и на токи Фуко, измеренные при максимальной индукции, равной 10 000 и 15 000 гауссов при частоте тока 50 Hz и при синусоидальной форме кривой приложенного напряжения, не должны превосходить величин, указанных в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2.

Марка	Толщина листов *мм*	Потери в W/*кг* стали	
		при 10 000 гауссах	при 15 000 гауссах
Ст. Д	0,5	3,3	7,9
Ст. С	0,5	2,3	5,6
Ст. Т	0,5	1,7	4,0
Ст. Т	0,35	1,3	3,3

Из таблицы 1 видно, что при 100 ампер-витков на *см* динамная сталь Ст. Д дает индукцию 17 800 гауссов, тогда как трансформаторная сталь Ст. Т дает индукцию всего 16 500 гауссов. Следовательно, при одной и той же индукции, трансформаторная сталь потребует большее число ампервитков на 1 *см*.

Из таблицы 2 видно, что потери в трансформаторной стали Ст. Т—0,35 при индукции 15 000 гауссов составляют 3,3 W/*кг*, тогда как потери в динамной стали Ст. Д, при той же индукции, составляют 7,9 W/*кг*, т. е. почти в 2,5 раза больше. Помимо того, что легированное железо имеет почти в 2,5 раза меньшие потери сравнительно с динамным железом, оно обладает также значительно меньшей способностью к „старению“, т. е. способностью давать увеличение потерь на гистерезис и токи Фуко с течением времени. После 500 часов работы легированное железо понижает свои магнитные свойства в отношении потерь всего на 3—4% в сравнении с 6—8% у обыкновенного динамного железа. Согласно общесоюзному стандарту повышение магнитных потерь вследствие старения определяется следующими величинами:

для марки Ст. Д не более 6%
„ „ Ст. С не „ 3,5%
„ „ Ст. Т не „ 2%

Следует отметить, что в Германии удалось получить трансформаторное железо с потерями: 1 W/*кг* при индукции 10 000 гауссов и 2,45 W/*кг* при индукции 15 000 гауссов.

Трансформаторная сталь, как и динамная, изготовляется в виде листов определенных размеров. Общесоюзным стандартом установлены размеры листовой стали 1000 × 2000 *мм*² и 750 × 1500 *мм*² для всех марок. Листовая сталь марки Т изготовляется толщиною 0,35 и 0,5 *мм*, а листовая сталь остальных марок — только толщиною 0,5 *мм*.

От этих величин допускаются следующие отклонения:

а) в длине и ширине отдельных листов ± 5%,
б) в толщине отдельных листов ± 10%.

§ 6. Форма сечения частей сердечника.

Поперечное сечение той части сердечника трансформатора, на которую насаживаются катушки обмоток и которую в дальнейшем будем называть стержнем или керном, выбирается так, чтобы катушки имели наименьший периметр (в целях экономии меди). При одной и той же площади сечения круглое сечение стержня имеет меньший периметр, чем прямоугольное сечение. Отношение периметра круглого сечения к периметру квадратного сечения, при одной и той же площади, равно 0,88. Кроме того, как будет показано ниже, круглые катушки более прочны при коротких замыканиях. Казалось бы, что стержням трансформатора следовало бы придавать круглое сечение. Так как, однако, стержни трансформатора набираются из пластин листового железа, то выполнение сердечника с круглым сечением было бы весьма затруднительно; в этом случае пришлось бы резать пластины постепенно уменьшаю-

щейся ширины. Чтобы все же приблизить сечение стержней сердечника к круглому сечению, эти стержни собираются из отдельных пакетов пластин разной ширины, которые в совокупности дают стержень, приближающийся к цилиндрическому.

Степень приближения сечения стержня к круглому в зависимости от мощности трансформатора берется неодинаковой. У трансформаторов средней мощности сечение стержня берется обычно кре-

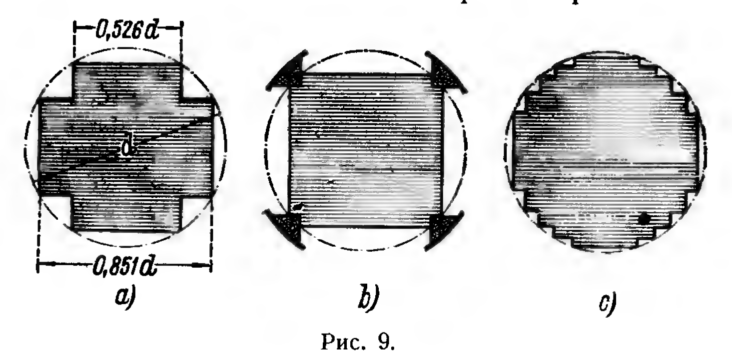


Рис. 9.

стообразное с примерными размерами, указанными на рис. 9а; при этих размерах получается наилучшее использование площади описанного вокруг сечения круга с диаметром d. Часто, однако, отступают от приведенных на рис. 9а наивыгоднейших размеров, придавая стержню менее ясно выраженное крестообразное сечение, приближающееся к прямоугольному (рис. 9b); получающиеся углы в стержне используются для установки распорных вставок, удерживающих на месте обмотку. Трансформаторы большой мощности имеют сечение стержня, весьма приближающееся к круглому (рис. 9с).

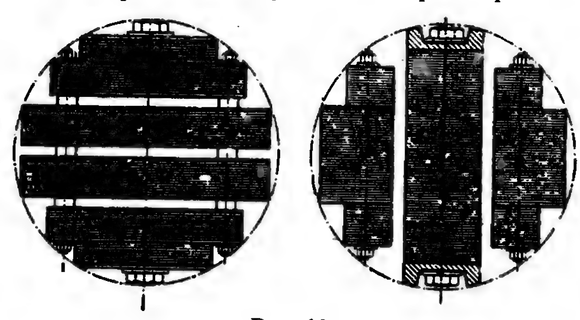


Рис. 10.

С целью охлаждения при больших сечениях внутри сердечников оставляют каналы, собирая сердечники из пакетов разной ширины. На рис. 10 изображены сечения сердечников с каналами для охлаждения. У первого сердечника (рис. 10а) каналы идут вдоль листов железа, у второго сердечника (рис. 10b) — поперек листов железа. Наиболее интенсивное охлаждение получается при расположении каналов поперек листов железа, так как поток тепла, получающегося в железе, в этом случае направляется вдоль листов, а не поперек листов, как в первом случае, когда этому потоку приходится проходить через изоляцию между листами.

Условия производства заставляют, однако, располагать каналы для охлаждения вдоль листов железа. Надлежащее расстояние между пакетами стержня обеспечивается подходящими распорками,

не мешающими прохождению охлаждающей среды (обычно масла).

Во многих случаях экономия меди, получающаяся при круглом сечении, уступает иногда место простоте и более дешевой конструкции стержней с прямоугольным сечением. При прямоугольном сечении стержней пластины железа получают одинаковую ширину, что упрощает их резку. Сборка стержней с прямоугольным сечением также облегчается.

Так как периметр прямоугольного сечения, при одной и той же величине сечения, больше периметра круглого сечения, то поверхность охлаждения обмотки при прямоугольном сечении сердечника получается больше, чем при круглом сечении. Последнее обстоятельство также говорит в пользу прямоугольного сечения стержня. Однако выполнение прямоугольной обмотки, а также укрепление ее на стержнях более затруднительно, чем цилиндрической обмотки; на прямых участках проводники легко выпучиваются и не ложатся параллельно. Изгибы проводников на углах могут вызвать порчу изоляции.

Цилиндрические катушки более совершенны, чем прямоугольные; их механическая прочность превосходит механическую прочность прямоугольных катушек.

С другой стороны при цилиндрических катушках расстояние между соседними стержнями больше, чем при прямоугольных катушках, а это имеет следствием увеличение объема железа ярма. В тех случаях, когда экономия меди в катушках и механическая прочность последних не играют особой роли, что имеет место, например, у стержневых трансформаторов небольшой мощности, предпочитают применять стержни с простейшим прямоугольным сечением. В тех же случаях, когда экономия меди по абсолютной величине довольно велика и от катушек требуется особая механическая прочность, что имеет место, например, у трансформаторов большой мощности, подверженных частым коротким замыканиям, применяют обычно стержни круглого сечения.

Что касается ярма, то оно выполняется обычно с прямоугольным сечением в целях упрощения сборки и удешевления всей конструкции сердечника; часто встречаются, однако, сечения ярма Т-образные (у трансформаторов небольшой мощности).

Следует отметить, что при оценке конструкции сердечников трансформаторов основываются не на одном только отношении площади поперечного сечения сердечника к площади поперечного сечения, обнимаемого катушкою, в предположении, что она непосредственно насажена на сердечник. У крестообразных и ступенчатых сечений за последнюю площадь принимают площадь окружности, описанной вокруг сечения сердечника и касающейся его внешних граней (на рис. 9 — окружности с диаметром d). Дело в том, что в полное сечение стержня входит не только железо, но и изоляция между пластинами железа, а также иногда и каналы для

охлаждения (см. рис. 10). Поэтому, оценивая сердечники трансформатора, говорят часто об отношении площади поперечного сечения только одного железа, проводящего магнитный поток, к площади поперечного сечения, обнимаемого катушкою, в предположении непосредственной насадки ее на сердечник (обычно между катушкою и стержнем имеется изоляционная прослойка). Это отношение называют коэфициентом заполнения железом сечения сердечника.

При толщине изоляционной бумаги между листами железа около 0,04 *мм* и толщине железа 0,35 *мм* бумага занимает примерно 10% длины сечения сердечника, взятой поперек листов железа. Следовательно, если бы сердечник и надвинутая на него катушка имели прямоугольное сечение и сердечник не имел бы каналов для охлаждения, то коэфициент заполнения сечения сердечника железом был бы равен 90%. Это и есть наибольший возможный коэфициент заполнения. У крестообразного сердечника без каналов для охлаждения коэфициент заполнения равен примерно 70%; у двухступенчатого сечения (без каналов) коэфициент заполнения равен примерно 74%.

У сердечников с каналами для охлаждения коэфициент заполнения железом снижается до 55—70%.

Путем применения для трансформаторов железа толщиною 0,5 *мм* и замены бумажной изоляции лакировкой[1] коэфициент заполнения железом сечения сердечника удалось повысить до 80%. Увеличение коэфициента заполнения с 70% до 80% имеет следствием экономию меди по крайней мере на 10%.

§ 7. Общая конструкция сердечников однофазных трансформаторов.

Сердечники однофазных и трехфазных трансформаторов конструируются обычно таким образом, чтобы катушки обмоток можно было изготовлять отдельно на особых станках и затем пускать их в сборку в готовом виде. С этой целью пластины железа сердечников режутся вполне определенной формы и собираются определенным способом. Форма пластин железа диктуется еще и тем, чтобы при нарезке их из листов железа стандартных размеров получилось возможно меньше отходов. Что касается способа сборки пластин, то он должен обеспечить наименьшее магнитное сопротивление сердечников; только при этом условии намагничивающий ток трансформатора будет небольшим. У маломощных трансформаторов (например, у звонковых трансформаторов), у которых намагничивающий так, вообще говоря, относительно велик, сердечник набирается часто из неразрезанных пластин. Катушки наматываются в этом случае вручную на готовый сердечник.

Примером связи частей сердечника в притык может служить сердечник однофазного трансформатора стержневого типа, изображенный на рис. 11. Как видно из рисунка, сердечник составляется из двух отдельных стержней (керн) и двух ярем, которые тем или иным способом к ним притягиваются. Как стержни, так и ярма набираются независимо друг от друга.

У мощных трансформаторов сердечники собираются из нарезанных пластин железа, причем отдельные части сердечника (ярмо и стержни) связываются друг с другом или „в притык“ или же „в нахлестку“.

Для того чтобы при сборке получить правильное положение стержней относительно каждого ярма, у мощных трансформаторов применяются цапфы (на рис. 10 изображены пунктиром), которые входят в углубления, имеющиеся в ярмах и в стержнях. Цапфы изготовляются из не проводящих электрический ток материалов, во избежание металлического соединения листов железа друг с другом и появления больших токов Фуко. Для уменьшения токов Фуко в сердечнике прокладывают иногда в местах стыка стержней и ярма прессшпан, асбестовую бумагу или не растворимый в масле миканит. Назначение этих прокладок заключается в изолировании пластии железа ярма от пластин стержней, так как трудно смонтировать сердечник так, чтобы пластины ярма являлись продолжением пластин стержня. В том случае, когда пластины ярма в месте стыка попадают между пластинами стержня, нарушается изоляция последних друг от друга, что влечет за собою увеличение токов Фуко. Так как сборка сердечников в притык допускает изготовление частей сердечника каждой в отдельности и монтаж этих частей несложен, то такой метод сборки и применяется весьма часто у мощных и стержневых трансформаторов.

Рис. 11.

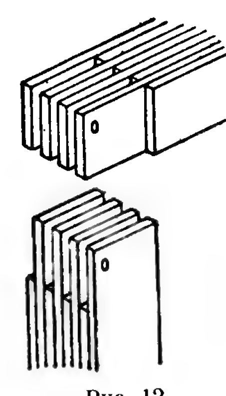


Рис. 12.

При выполнении связи частей сердечника в нахлестку („в набор“, в „переплет“, или шихтовкой) пластины одной части, например стержня, переплетаются с пластинами другой части, например ярма, образуя в месте соединения слой из пластин, принадлежащих поочередно одной и другой части. Рис. 12 дает ясное представление о соединении листов железа в нахлестку.

Примером выполнения сердечника однофазного трансформатора стержневого типа в нахлестку может служить сердечник, изображенный на рис. 13. Этот сердечник собирается из чередующихся друг с другом слоев *a* и *b*, из которых каждый содержит пластины только двух размеров. При наложении одного слоя на другой места

[1] Железные листы иногда покрываются при высокой температуре эмалью, которая оказывается стойкой против действия нагретого масла.

стыков пластин одного слоя покрываются пластинами другого слоя.

Примером выполнения сердечника однофазного трансформатора броневого типа в нахлестку может служить сердечник, изображенный на рис. 14. Сердечник состоит из двух частей, причем каждая часть составляется из двух пар одинаковых пластин *1—1* и *2—2*. Отдельные слои пластин накладываются друг на друга таким образом, что стыки одного слоя перекрываются пластинами следующего слоя.

Рис. 13.

В виду того, что сердечники, набранные в нахлестку, требуют несколько меньший намагничивающий ток и меньше гудят при неудовлетворительной сборке, чем сердечники, набранные в притык, в настоящее время имеется тенденция сердечники больших трансформаторов стержневого типа выполнять также в нахлестку.

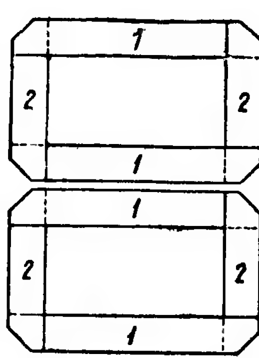
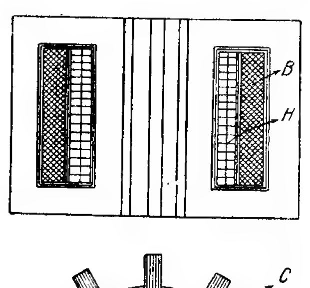
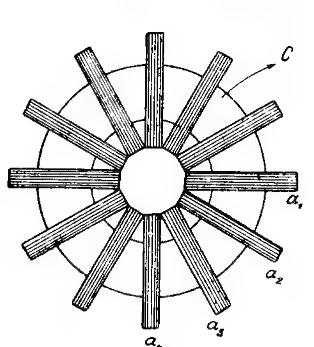


Рис. 14.

Своеобразную конструкцию имеет сердечник у так называемого „Берри-трансформатора" броневого типа, схематически изображен-





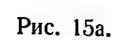
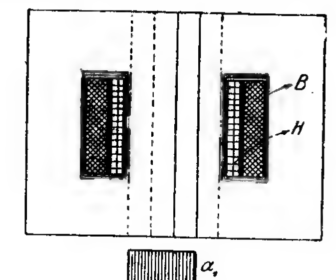


Рис. 15a.



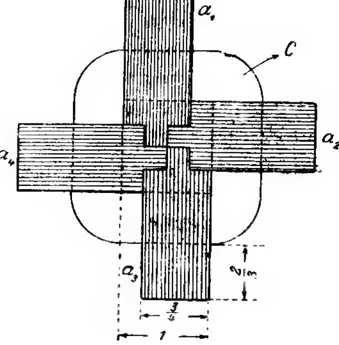


Рис. 15b.

ного на рис. 15a. Как видно из рисунка, сердечник этого трансформатора состоит из ряда колец a_1, a_2. a_3..., охватывающих

кольцевые обмотки высокого и низкого напряжения *B* и *H* равномерно по всему их периметру.

Анологичную, но более упрощенную конструкцию имеет сердечник трансформатора, схематически изображенного на рис. 15b. Сердечник этого трансформатора состоит из четырех пластинчатых колец a_1, a_2, a_3 и a_4, охватывающих обмотки *B* и *H* и расположенных под прямым углом друг к другу.

Для того, чтобы сердечнику придать механическую прочность, пластины его сжимаются или при помощи болтов и заклепок, проходящих через толщу сердечника, или же при помощи чугунных плит (или швеллеров), накладываемых на сердечник. Все устройство, предназначенное для придания механической прочности сердечнику, должно выполняться так, чтобы оно не мешало охлаждению трансформатора и не вызывало добавочных потерь от токов Фуко. В том случае, когда сжимные болты или заклепки пропускаются через толщу сердечника, эти болты должны быть тщательно изолированы от железа, во избежание электрического соединения ими пластин железа, что влечет за собою увеличение потерь на токи Фуко в железе. У трансформаторов небольшой мощности в качестве сжимных болтов с успехом применяют деревянные шпильки, проходящие через толщу сердечника, с ввинчиваемыми в них с торцов шурупами для дерева.

Чтобы получить равномерное сжатие листов, под сжимные болты подкладываются железные пластины толщиною около 1 *мм*. Сжимные плиты (щеки) целесообразно выполнять из немагнитного материала. Часто, однако, их выполняют из чугуна, но располагают так, чтобы они не увеличивали магнитное рассеяние обмоток и тем самым не увеличивали потерь на токи Фуко. У трансформаторов небольшой мощности, работающих в масле, сжимные щеки у ярма выполняются из дерева.

В настоящее время производятся опыты в отношении полной или частичной замены стяжных болтов склеиванием железных листов помощью бакелитовой массы при высоком давлении (10—50 *ат*).

§ 8. Общая конструкция сердечников трехфазных трансформаторов.

Сердечники трехфазных трансформаторов стержненого типа выполняются в настоящее время со стержнями, расположенными в один ряд (рис. 7). Связь стержней с ярмами осуществляется или в притык или в нахлестку. В первом случае стержни и оба ярма изготовляются совершенно самостоятельно и затем при сборке, после наложения катушек, стягиваются при помощи сжимных плит и болтов. Соединение ярма с сердечниками в притык, в виду простоты выполнения, применяется довольно часто у мощных трансформаторов.

Во втором случае сердечник и одно ярмо набираются одновременно, с чередованием пластин, как было указано ранее; пластины же второго ярма набираются после наложения на сердечники катушек обмотки (рис. 16).

При изготовлении мощных трансформаторов стержневого типа сборка железа в нахлестку представляет большие затруднения из-

за значительной ширины листов. С целью применения сборки пластин в нахлестку и для мощных трансформаторов завод Сименс-Шуккерт выполняет сердечники из отдельных рам, вставляемых одна в другую с воздушным зазором между ними. На рис. 17 изоб-

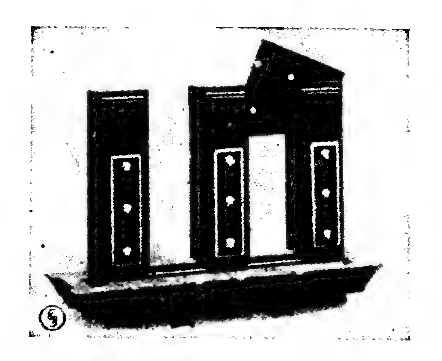


Рис. 16.

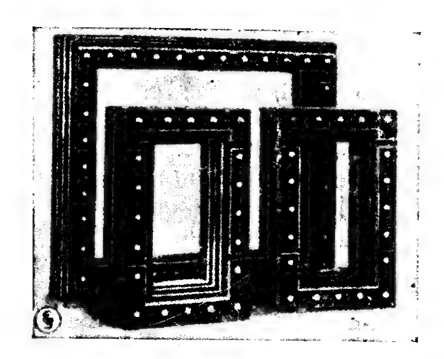


Рис. 17.

ражены три рамы, которые в совокупности должны дать сердечник трехфазного трансформатора. Перед укладкой катушек верхние поперечины всех рам разбираются (рис. 18).

При изготовлении сердечников размеры пластин выбираются такими, чтобы при резке из стандартных листов получалось возможно меньше отходов.

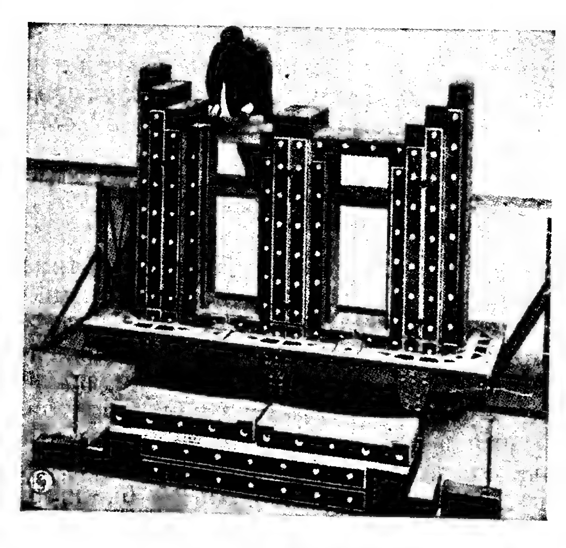


Рис. 18.

Кроме того, число пластин разных размеров берется наименьшим.

На рис. 19 иллюстрирован один из способов резки пластин и укладки их в два слоя, поочередно накладываемых друг на друга при сборке сердечника. Если стержни имеют прямоугольное сечение, то, как видно из рисунка, число пластин с разными размерами может быть равно трем. При наложении слоев стыки пластин одного слоя покрываются пластинами другого слоя.

Если стержни имеют ступенчатое или крестообразное сечение, как изображено на рис. 9, то пластины ярма приходится делать разной длины: более короткие по середине и более

длинные по бокам. Последнее обстоятельство несколько обесценивает описываемый способ резки и сборки пластин в применении к сердечникам с круглым сечением стержней.

На рис. 20 изображен другой способ резки и укладки пластин, требующий наложения друг на друга трех слоев. Число пластин разных размеров равно четырем, но так как короткие пластины ярма вдвое короче длинных пластин того же ярма *4—4*, то изготовление их из длинных пластин весьма просто.

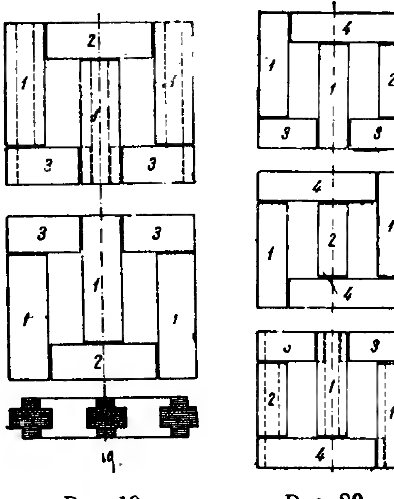
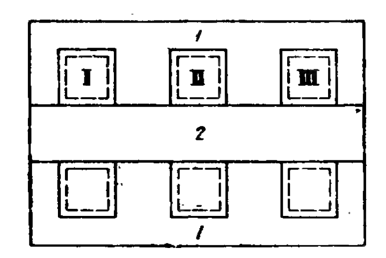


Рис. 19. Рис. 20.

Сердечники трехфазных трансформаторов броневого типа выполняются со сборкой или в притык или в нахлестку. На рис. 21 иллюстрированы два способа изготовления сердечников трансформаторов броневого типа в притык. При первом способе требуются пластины трех разных форм, при втором способе требуются пластины четырех форм.

Сборка сердечников трансформаторов броневого типа в притык применяется у трансформаторов небольшой мощности. У трансформаторов большой мощности сердечник собирается в нахлестку. На рис. 22 изображены два слоя (накладываемые поочередно друг на друга) сердечника трансформатора броневого типа со сборкой в нахлестку. Число пластин разной формы равно четырем.

На рис. 23 изображена конструкция сердечника трансформатора броневого типа (зав. Сименс-Шуккерт) с большим подразделением железа. Число пластин разной формы равно двум. Отдельные части собираются в притык.



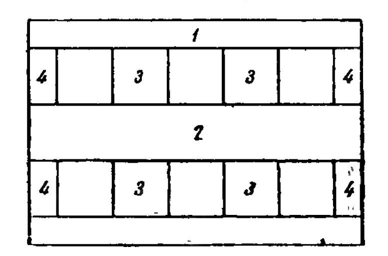


Рис. 21.

Несколько своеобразную конструкцию имеют сердечники трансформаторов стержневого типа весьма большой мощности. У таких трансформаторов сердечник часто имеет не три, а пять стержней, причем обмотки наложены только на три средние сердечника. На рис. 24 изображен пятистержневой сердечник трансформатора рекордной мощности 100 000 kVA, 220/110 kV (AEG). Боковые стержни

добавлены с целью ослабления магнитного потока в ярме, вследствие чего сечение ярма уменьшается почти в два раза сравнительно с сечением без боковых стержней. Уменьшение сечения ярма имеет следствием уменьшение высоты трансформатора, что необходимо в целях облегчения транспорта по железным дорогам весьма мощных трансформаторов.

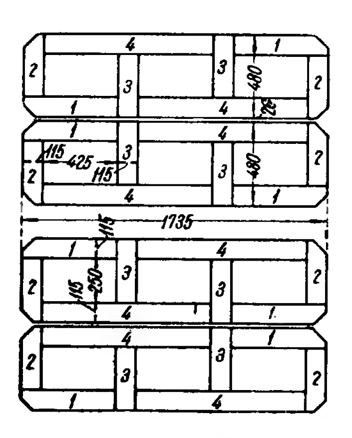


Рис. 22.

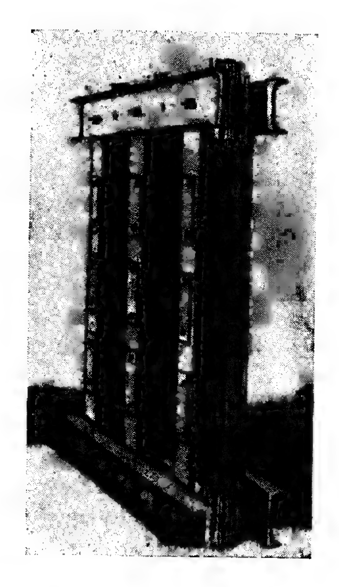


Рис. 23.

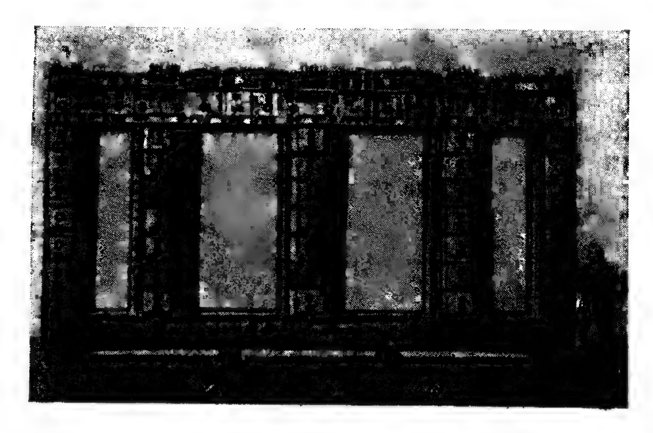


Рис. 24.

§ 9. Вопросы для самопроверки.

1. Каковы электромагнитные свойства трансформаторного железа?
2. Как устроены стержни и ярма трансформатора?
3. Что такое легированное железо?
4. Что называется коэфициентом заполнения железом сечения сердечника?
5. Как соединяются стержни с ярмами трансформатора?
6. Как устроен сердечник пятистержневого трансформатора?

ГЛАВА ТРЕТЬЯ.

ОБМОТКИ ТРАНСФОРМАТОРОВ.

§ 10. Обмоточная медь.

Обмотки трансформаторов, в зависимости от необходимого сечения, изготовляются или из круглых медных проволок, или же из проводников прямоугольной формы. Обмотки высокого напряжения чаще изготовляются из круглых проволок, так как изолирование их представляет меньшие затруднения, чем изолирование проводников прямоугольного сечения; кроме того, процесс изготовления обмотки из прямоугольных проводов при малых сечениях труден, вследствие возможности перекручивания. Обмотки низкого напряжения у больших трансформаторов изготовляются обычно из проводников прямоугольного сечения, так как, вследствие большой площади сечения, круглые проволоки имели бы слишком большой диаметр. Во избежание потерь от токов Фуко, индуктируемых потоком рассеяния в меди обмотки при больших сечениях, а также в целях облегчения фабрикации обмоток, проводники часто составляются из отдельных лент, располагаемых большой стороной по длине сердечника (см. далее).

Круглая проволока берется диаметром не больше 3,5 *мм*, так как проволока с большим диаметром затрудняет работу по намотке катушек и дает плохое использование сечения этих катушек.

Проводники прямоугольного сечения берутся не свыше 200 *мм*², что соответствует предельным размерам 8×25 *мм*; делается это с целью уменьшения потерь от токов Фуко в проводниках. Как круглые, так и прямоугольные проводники изолируются хлопчатобумажной обмоткой в комбинации с эмалью или бумагой. Насколько увеличивается диаметр круглой проволоки с разной изоляцией можно видеть из таблицы 3.

ТАБЛИЦА 3.

Диаметр голой проволоки *мм*	Увеличение диаметра голой проволоки с изоляцией *мм*			
	a	*b*	*c*	*d*
0,50—0,75	0,20	0,25	не изготовл.	не изготовл.
0,75—1,00	0,25	0,27	" "	" "
1,00—1,45	0,25	не изготовл.	0,5	" "
1,45—2,00	0,30	" "	0,5	0,9
2,00—3,00	0,40	" "	0,6	1,1

Проволока с изоляцией *a* — проволока с двойной хлопчатобумажной обмоткой; применяется для напряжения до 6 kV.

Проволока с изоляцией *b* — проволока, покрытая слоем эмали, на который наложена двойная хлопчатобумажная обмотка; применяется в тех случаях, когда изоляция *a* считается недостаточной.

Следует отметить, что проволока с одной эмалевой изоляцией

для изготовления трансформаторных катушек не применяется, так как при этой изоляции получается крайне небольшое расстояние между соседними проволоками витков. Возможная порча слоя изоляции, например трещина, приводит в этом случае к тому, что получающийся незначительный воздушный слой между проводниками пробивается напряжением, имеющимся между ними. Навиваемая на слой эмали хлопчатобумажная обмотка увеличивает расстояние между соседними витками, следовательно увеличивает толщину слоя воздуха между соседними проволоками в случае порчи изоляционных покровов.

Проволока с изоляцией *c* — проволока, покрытая двумя повивами бумаги и двойной хлопчатобумажной обмоткой; применяется для входных катушек при напряжении до 6 kV и для средних катушек при напряжении до 20—35 kV.

Проволока с изоляцией *d* — проволока, покрытая четырьмя повивами бумаги и двойной хлопчатобумажной обмоткой; применяется для входных катушек при напряжении 22—35 kV.

При напряжениях, доходящих до 60—110 kV, увеличение диаметра голой проволоки доходит до 2—2,5 *мм.*

Увеличение размеров проводника прямоугольного сечения, в зависимости от величины сечения и сорта изоляции, составляет 0,6—0,8 *мм* на две стороны; последняя цифра (0,8 *мм*) получается при двух слоях бумажной изоляции с покрытием двойной хлопчатобумажной обмоткой.

Проводники обмотки масляных трансформаторов обычно изолируются оплеткой из бумажной ленты. При больших сечениях проводники прямоугольного сечения иногда не изолируются, но отдельные витки из них при выполнении катушки изолируются друг от друга прокладками из бумаги.

§ 11. Типы обмоток.

По способу выполнения обмотки трансформаторов распадаются на цилиндрические и дисковые. Цилиндрические обмотки представляют собою в целом полые цилиндры, окружающие сердечники по всей их длине (рис. 25). Ближе к сердечнику располагается обычно обмотка низшего напряжения *H*, так как ее легче изолировать от сердечников. На обмотку низшего напряжения, коаксиально с нею, надвигается цилиндрическая обмотка высшего напряжения *B*. Таким образом, при указанном выполнении внутренний цилиндр будет служить обмоткою низшего напряжения, тогда как наружный цилиндр — обмоткою высшего напряжения.

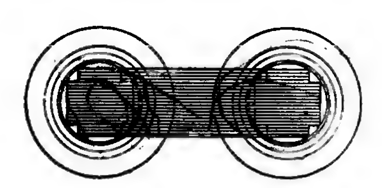


Рис. 25.

В небольших трансформаторах цилиндрические обмотки выполняются непрерывной намоткой проводника. В трансформаторах большой мощности и высокого напряжения цилиндрические обмотки составляются из секций или катушек, разобщенных друг от друга изоляционными прокладками.

Для того, чтобы уменьшить потоки рассеяния трансформатора (см. дальше) катушки первичной и вторичной цилиндрических обмоток располагаются возможно ближе друг к другу и берутся с небольшими радиальными размерами.

С уменьшения рассеяния трансформатора часто обмотка низшего напряжения каждого сердечника делится на две цилиндрические катушки, причем одна катушка располагается непосредственно на сердечнике, а другая снаружи на обмотке высшего напряжения (рис. 26). Таким образом, катушка обмотки высшего напряжения находится между двумя катушками обмотки низшего напряжения.

Цилиндрические обмотки применяются преимущественно у стержневых трансформаторов высокого напряжения, когда разобщенность между первичной и вторичной обмотками должна быть особенно велика. Эта разобщенность между первичной и вторичной обмотками при высоких напряжениях достигается относительно большим радиальным расстоянием между катушками обмоток. Последнее обстоятельство, однако, имеет следствием повышенное рассеяние. Поэтому цилиндрические обмотки всегда дают несколько большее рассеяние, чем дисковые обмотки.

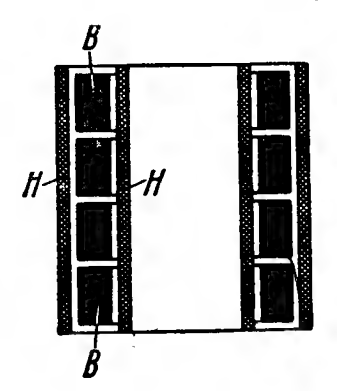
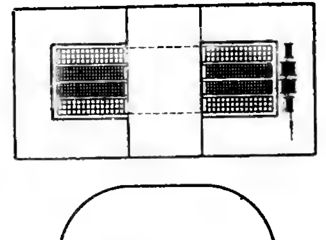


Рис. 26.



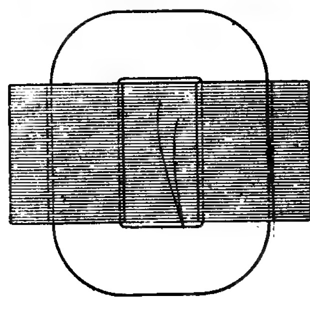


Рис. 27.

Дисковые обмотки составляются из плоских или дисковых катушек или секций, имеющих большой радиальный и небольшой осевой размеры. Катушки высшего напряжения располагаются на

сердечнике трансформатора поочередно с катушками низшего напряжения, причем надлежащая изоляция между ними получается при посредстве изоляционных прокладок и воздушных зазоров (рис. 27).

Для того чтобы обеспечить лучшую изоляцию обмоток от сердечников, у ярем располагают катушки обмотки низшего напряжения. С целью уменьшения магнитного рассеяния концевые катушки делаются обычно с вдвое меньшим числом витков, чем средние катушки. Так как у дисковой обмотки катушки обмоток высшего и низшего напряжения теснее переплетаются друг с другом, вследствие чего получается более совершенная компенсация ампервитков этих обмоток (см. далее § 26), то магнитное рассеяние при дисковой обмотке относительно меньше, чем при цилиндрической. Но тесное расположение катушек обмоток высшего и низшего напряжения требует весьма солидной изоляции между ними, если речь идет о трансформаторе высокого напряжения. Последнее обстоятельство ведет к увеличению высоты обмотки, а с нею и высоты сердечника. Дисковые обмотки применяются преимущественно в броневых трансформаторах, хотя при невысоких напряжениях и небольших мощностях они применяются также в стержневых трансформаторах.

§ 12. Конструкция обмоток трансформатора.

Конструкция катушек обмоток трансформатора, конструкция обмоток в целом, т. е. способ расположения катушек по высоте сердечника, способ изоляции катушек от сердечника, способ крепления катушек и т. д.—весьма важные проблемы трансформаторостроения. Удачная конструкция обмоток не только удешевляет стоимость трансформатора, но и повышает его эксплоатационные качества.

Существенным вопросом конструкции катушки является достаточная изоляция между витками соседних витков. Этой изоляции приходится выдерживать напряжения 150—250 V, а иногда и 400 V. На рис. 28 изображена катушка обычной конструкции: намотко витков идет в последовательности, указанной на рисунке, т. е. от проводника *1* к проводнику *5*, затем к проводнику *6* и *7* и т. д. При такой конструкции наибольшее напряжение будет между проводниками *1* и *10*. Оно равно числу витков, имеющихся между этими проводниками, умноженному на напряжение одного витка (на рис. 28 — десятикратному напряжению одного витка). Другими словами, это напряжение равно напряжению двух слоев. Напряжение одного витка колеблется в широких пределах, в зависимости от мощности и напряжения трансформатора. В таблице 4 даны примерные значения напряжения одного витка из проводников, имеющих двойной слой хлопчатобумажной пряжи. В весьма мощных трансформаторах напряжение витка может доходить до 100 V.

Чем выше напряжение одного витка, тем меньше витков должно быть в одном слое катушки (секции), чтобы не получилось большое напряжение одного слоя. По этой причине в мощных трансформаторах высота катушек (секций) берется обычно меньше, чем в мало-

ТАБЛИЦА 4.

Мощность трансформатора kVA	Напряжение одного витка V	
	Стержневой тип	Броневой тип
50	5,5	17—25
100	7	21—35
200	9	27—45
500	13	39—65
1 000	18	50

мощных трансформаторах. Для того чтобы несколько удалить соседние слои катушки друг от друга и тем самым увеличить надежность изоляции, каждый следующий слой навивается на прокладочки из бумажной ленты (см. на рис. 28 прокладки *a*, *b*, *c*). Эти прокладочки содействуют более правильному распределению витков в каждом слое, мешая проводникам заваливаться в промежутки между соседними проводниками нижнего слоя.

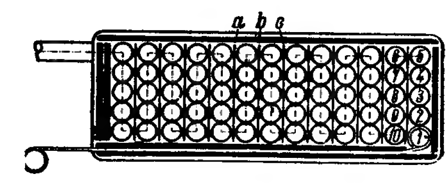


Рис. 28.

Выполненная на рис. 28 катушка имеет один конец снаружи, а другой конец внутри катушки. Таким образом пайка концов соседних катушек такой конструкции должна производиться не только снаружи, но и внутри катушек, по соседству с сердечником. Последнее обстоятельство составляет большое неудобство при сборке трансформатора. Поэтому внутренний конец часто выводят наружу, тщательно изолируя его от витков катушки. В последнем случае общая высота катушки несколько увеличивается. Чтобы избежать большого числа паек внутри катушек или увеличения высоты катушек, в настоящее время часто применяют сдвоенные катушки. Эти катушки состоят из двух одинаковых катушек или секций *A* и *B* (рис. 29), наматываемых каждая в отдельности, но складываемых так, что намотка витков их идет в противоположных направлениях. Концы секций спаиваются с внутренней стороны (на рис. 29 в месте *C*).

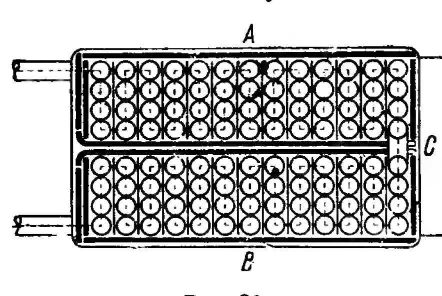


Рис. 29.

Обе секции получают общую изоляцию, составляя одну катушку. Между секциями прокладывается изоляция из пропитанной маслом бумаги.

При больших силах тока, когда катушки выполняются уже из проводников прямоугольного сечения, эти катушки разбиваются часто также на секции, содержащие по одному слою в секции. В качестве примера на рис. 30 приведена катушка из ленточной меди,

состоящая из четырех секций *a*, *b*, *c* и *d* с одним витком в слое. Секции *a* и *c* намотаны по часовой стрелке, секции *b* и *d* намотаны против часовой стрелки. В таком случае соединения между секциями имеются поочередно внутри и снаружи катушки. Между отдельными секциями прокладывается слой изоляции. При высоких напряжениях между витками медной изолированной ленты прокладываются дополнительно полоски картона.

Рис. 30.

При очень больших силах тока катушки цилиндрических обмоток выполняются иногда из одной спирали проводника прямоугольного сечения с намоткой на узкий кант, как указано на рис. 31.a. Проводник в этом случае берется или изолированным или голым; в последнем случае между отдельными витками всовываются изолирующие прокладки (см. рис. 31b и c). На рис. 31d изображена обмотка, состоящая из двух слоев прямоугольного сечения проводника, намотанного на широкий кант. Так как между начальным и конечными витками *1* и *40* имеется полное напряжение, то между этими витками кладется изоляционная прокладка.

Для облегчения изготовления катушек, а также для уменьшения потерь от токов Фуко при больших токах отдельные секции соединяют часто параллельно. Чтобы между параллельными ветвями не получались уравнительные токи, стараются их выполнить с одинаковыми активными и реактивными сопротивлениями. С этою целью витки отдельных секций располагаются по высоте обмотки на разных расстояниях от сердечника, т. е. выполняют обмотку с „транспозициями“ (пе-

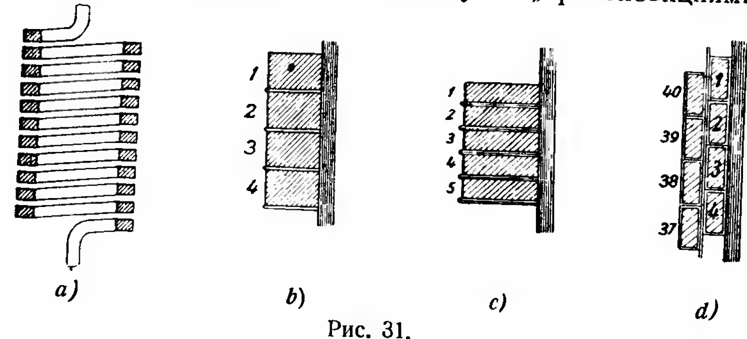


Рис. 31.

рекрещиваниями). На рис. 32 иллюстрирована идея устройства такой обмотки. Пунктирными линиями на этом рисунке показаны расположения витков по высоте сердечника обмотки, состоящей из четырех параллельных ветвей.

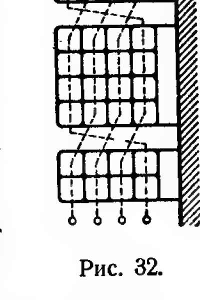
На рис. 33 иллюстрирована техника выполнения перекрещивания проводников при трех параллельных ветвях обмотки.

Так или иначе выполненная катушка подвергается обычно дальнейшей обработке. Она поступает в вакуумную печь, где тщательно высушивается, а затем пропитывается изолировочным лаком. Де-

лается это с целью удаления из изоляции следов влаги и, главное, воздуха. Вместо пропитывания лаком в последнее время, в особенности у сухих (без масла) трансформаторов высокого напряжения, стали употреблять пропитывание компаундною массою, в которую входят такие материалы, как асфальт и смола. Подогретая до температуры 95—100° C, эта компаундная масса под давлением вгоняется в катушку, предварительно высушенную в вакуум-печи, заполняя все воздушные щели и пазухи. По охлаждении катушка представляет собою как бы сплошную массу из меди, изоляции и компанундого вещества, довольно прочную в механическом отношении.

Катушки одной и той же обмотки при сборке изолируются друг от друга прокладками из картона или фибры так, чтобы эти прокладки не мешали циркуляции охлаждающей среды, т. е. масла или воздуха (см. на рис. 35 прокладки *6*—*6*).

Что же касается обмоток низшего и высшего напряжения, то они изолируются друг от друга гильзами из слоев бумаги с прокладками из слюды. Эти гильзы или изолирующие цилиндры, как и вообще прокладки, применяемые при сборке, пропитываются изолировочным лаком после тщательного высушивания в вакуум-печи.


Рис. 32.

Наибольшую легкость в отношении изолирования обмоток высшего и низшего напряжения друг от друга, а также от сердечников трансформаторов представляют цилиндрические обмотки. У цилиндрических обмоток катушки высшего и низшего напряжения отделяются друг от друга и от железных стержней непрерывно по высоте бумажными гильзами.

Толщина изолирующих цилиндров, а также концевых колец зависит от величины напряжения трансформатора. В небольших сухих трансформаторах с напряжением до 3000 V изолирующие цилиндры иногда совершенно отсутствуют. В таких трансформаторах обмотка низшего напряжения обматывается слоем бумаги, на который и надвигается обмотка высшего напряжения.

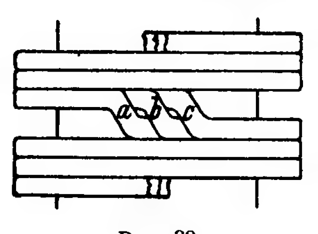


Рис. 33.

От ярма обмотки изолируются концевыми прокладками из пропитанного маслом дерева и фибры или фарфора. На рис. 34 для примера изображены разные способы изоляции обмоток от ярма, в зависимости от напряжения трансформатора. На рис. 34a обмотка низшего напряжения опирается на деревянные сегменты *H*, тогда как обмотка высшего напряжения опирается на фарфоровые сегменты *P*. Сегменты *H* и *P* удерживаются на месте шнурками. Между обмотками имеются цилиндрические гильзы; между сердечниками и обмоткою низшего напряжения вставлены прокладки из дерева или бумаги *L*. На рис. 34b обмотка опирается на ряд сегментов *H*, между которыми проло-

жен картон *K*. Сегменты опираются в свою очередь на железное кольцо *E*, поддерживаемое болтами, служащими для сжимания обмотки с целью придания ей механической крепости. На рис. 34*c* обмотка высшего напряжения опирается на разрезанное железное кольцо *R*, поддерживаемое фарфоровыми изоляторами; обмотка низшего напряжения опирается на деревянные подкладки, размещенные в пространстве *A*.

Примером выполнения цилиндрической обмотки может служить обмотка, изображенная на рис. 35. Как видно из рисунка, обмотка низшего напряжения, выполненная из проводников большего сечения *2*, расположена внутри обмотки высшего напряжения, выполненной из проводника меньшего сечения *1*. Отдельные секции обеих обмоток

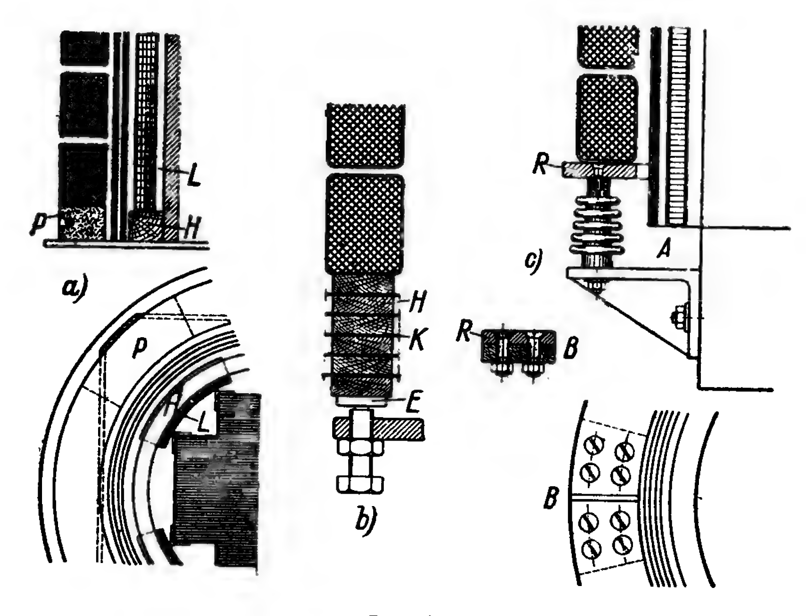


Рис. 34.

имеют форму дисков с одним слоем витков. Будучи наложены одна на другую с необходимыми дистанционными прокладками *8* и *7* и изоляционными кольцами *6*, эти секции дают две цилиндрические катушки с высотою почти равной высоте сердечника. Обмотка низшего напряжения отделена от железного сердечника изоляционной гильзой *4*; обмотки низшего и высшего напряжения отделены друг от друга двумя изоляционными гильзами *4*, удерживаемыми на определенном расстоянии кольцевыми изоляционными фланцами *5*. Прокладки и изоляционные гильзы расположены таким образом, что вокруг обмоток получаются свободные каналы *3* для циркуляции масла. У обмотки высшего напряжения концевые секции *8* имеют меньшее число витков, изолированных более сильно, чем витки средних секций. Делается это по той причине, что включение и выключение вторичной цепи, а также грозовые разряды в линиях, соединенных с трансформатором, вызывают

обычно перенапряжение именно на концевых катушках (см. далее). Те же концевые секции обмотки высшего напряжения особенно надежно изолируются от ярма фланцами *5* и торцевыми кольцами.

Следует отметить, что тот или иной способ изоляции обмоток низшего и высшего напряжения друг от друга, а также от железного сердечника в большой мере сказывается на стоимости трансформатора. В особенности это относится к трансформаторам высокого напряжения. В самом деле, возможное уменьшение радиального расстояния между обмотками низшего и высшего напряжения, а также обмоток от сердечника ведет к экономии меди обмоток. Эти расстояния за последние годы имеют тенденцию уменьшаться. Например, если раньше для напряжения 110 kV расстояние между обмотками низшего и высшего напряжения бралось равным 80—90 *мм*, а расстояние обмотки низшего напряжения от ярма бралось равным 250 *мм*, то в настоящее время эти расстояния берутся соответственно 70 *мм* и 140 *мм*. Длина сердечника сокращается при этом до 200 *мм*. Такое уменьшение названных расстояний стало возможным, благодаря применению уголковых фланцев на концах обмотки высшего напряжения и системы многих тонких гильз между обмотками высшего и низшего напряжения. Для примера на рис. 36 приведена конструкция обмоток трансформатора на напряжение 110 kV. Как видно из рисунка, между обмотками высшего и низшего напряжения *B* и *H* имеются две изоляционные гильзы; между обмоткою низшего напряжения *H* и сердечником имеется одна гильза. От ярма обмотка высшего напряжения отделена двумя уголковыми фланцами.

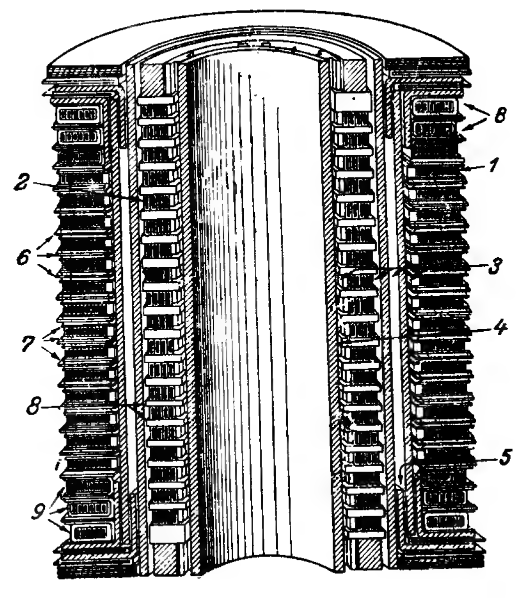


Рис. 35.

На рис. 37 приведена конструкция обмоток трансформатора 60 000 kVA с тремя отдельными обмотками на напряжения 220 kV, 110 kV и 10 kV. Обмотка высшего напряжения *a* (на 220 kV) отделена от двух других обмоток несколькими цилиндрами из бумаги, схваченными на торцах угловыми кольцами также из бумаги. Обмотка среднего напряжения *b* (на 110 kV) состоит из двух катушек; обмотка низшего напряжения (третичная) *c* состоит из одной катушки. Последняя обмотка расположена ближе к сердечнику.

При дисковой обмотке, как указано было ранее, катушки высшего и низшего напряжения чередуются друг с другом, причем при укладке разобщаются изоляционными прокладками. От сердечника катушки изолируются гильзами или прокладками. Особое вни-

мание при этом уделяется изоляции катушек обмотки высшего напряжения, так как они у дисковых обмоток прилегают к сердечнику.

На рис. 38 приведен один из способов изоляции дисковых обмоток. Катушки обмотки высшего напряжения *1—1* и обмотки низшего напряжения *2—2* разбиты на секции, которые прокладками изолированы друг от друга. Сами катушки высшего и низшего напряжения также изолированы друг от друга солидными прокладками.

На рис. 39а изображена одна катушка дисковой обмотки, на которой

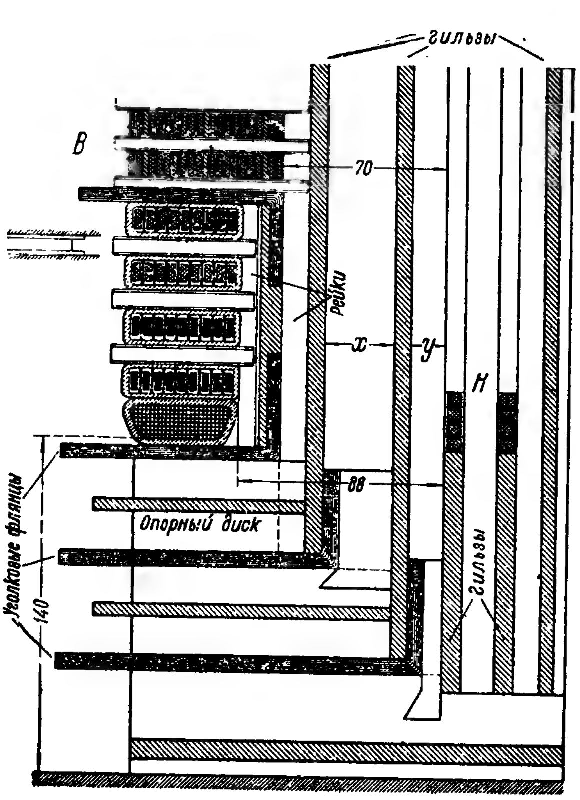


Рис. 36.

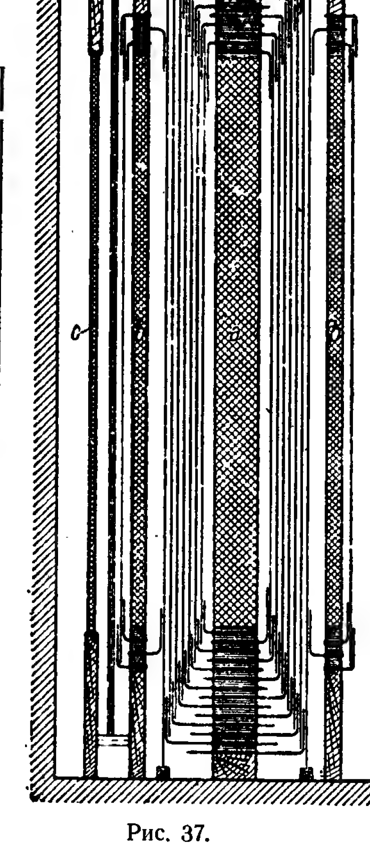


Рис. 37.

видны радиальные прокладки; на рис. 39b изображен броневой трансформатор в процессе сборки сердечника.

При конструировании обмоток трансформатора в целом большое внимание уделяется механической прочности их. Дело в том, что при коротких замыканиях, как мы увидим далее, на обмотки действуют механические силы, стремящиеся придать катушкам цилиндрическую форму и оттолкнуть одну катушку от другой вдоль сердечника.

Для предотвращения деформации катушек и происходящей от этого порчи изоляции катушки более мощных трансформаторов солидно укрепляются, так чтобы они плотно сидели на месте и не могли сдвинуться под действием механических сил.

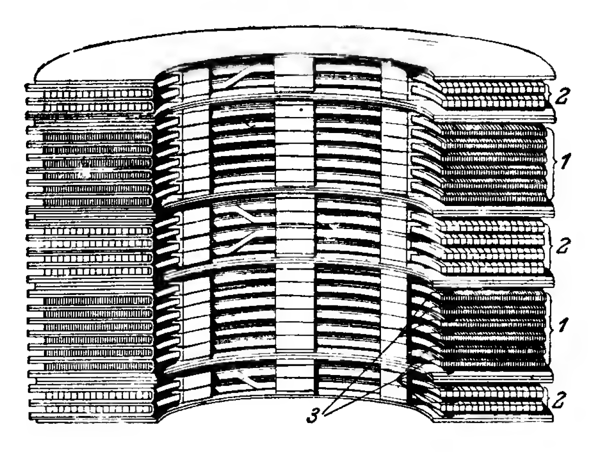
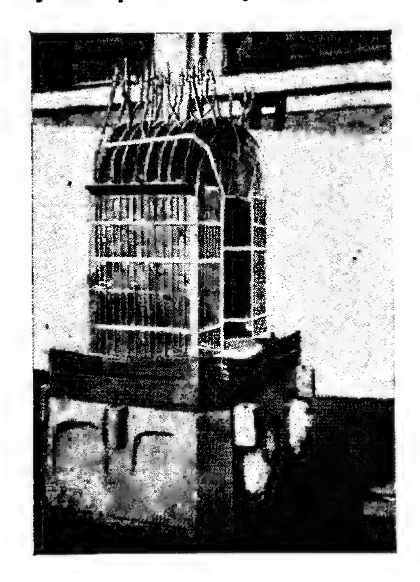


Рис. 38.

На рис. 40 изображены схематически обмотки без специальных креплений (рис 40а) и с креплениями (рис. 40b и 40c).

В первой конструкции между катушками имеются простые прокладки *a—a*, которые не мешают секциям катушки перемещаться вдоль оси сердечника. Во второй и третьей конструкциях силы, действующие по оси сердечника на катушки, передаются прокладкам *b—b* и через них опорным кольцам *B*. Обмотку первой конструкции называют неразгруженной, обмотку второй и третьей конструкций — разгруженной. Для при-



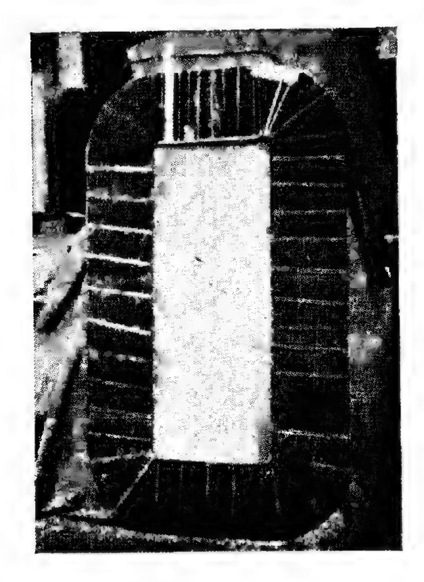


Рис. 39.

дания механической прочности обмотке в целом все катушки сжимаются с торцов опорными кольцами *A—B*. В некоторых конструкциях торцовые опорные кольца упираются в ярма сердечника при посредстве пружин, служащих для смягчения осевых ударов при коротком замыкании в сети.

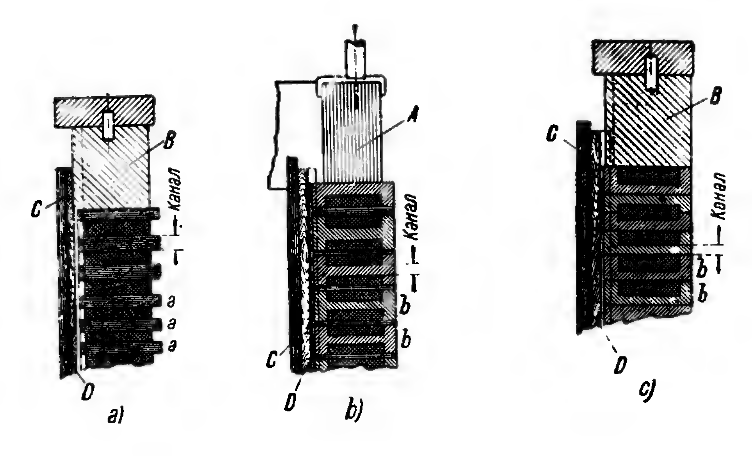


Рис. 40.

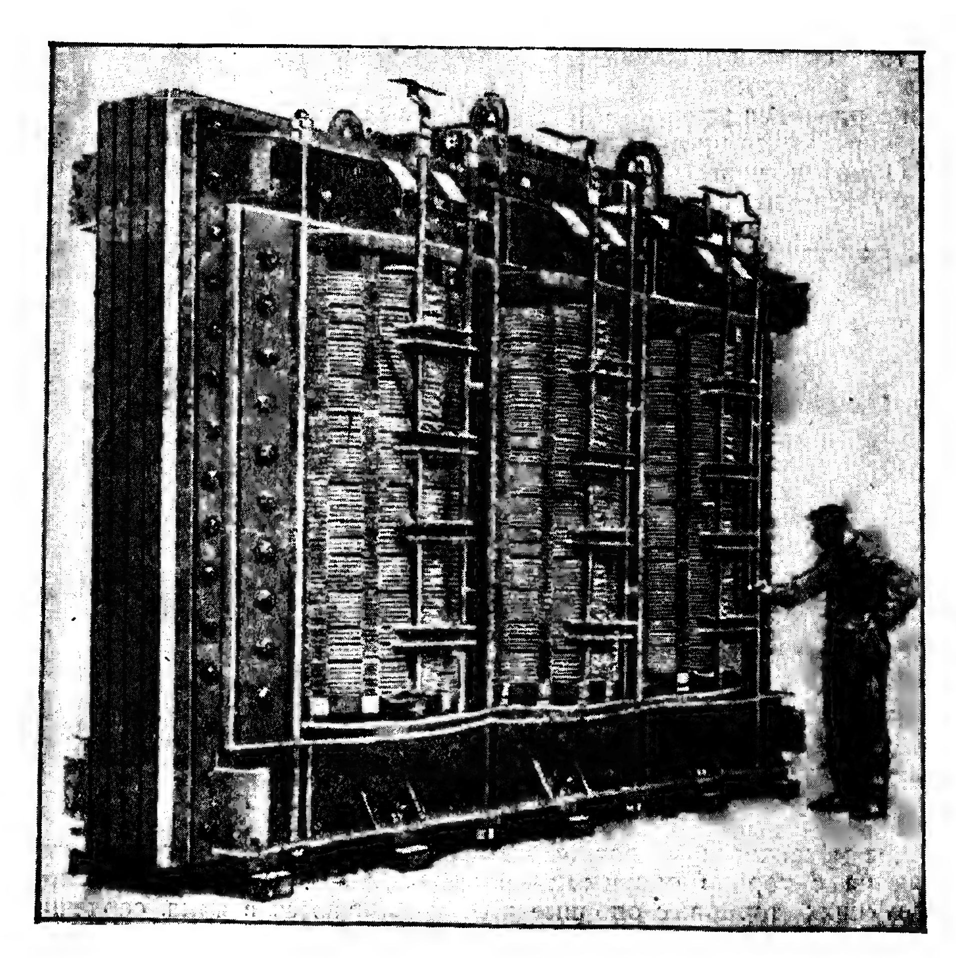


Рис. 41.

На рис. 41 изображен трехфазный трансформатор мощностью 35 700 kVA с напряжениями 7250/33 000 V при частоте 50 Hz. Трансформатор принадлежит к типу пятистержневых трансформаторов. На рисунке видны крепления отдельных секций обмотки высшего напряжения. Обмотка низшего напряжения — цилиндрическая; каждый виток ее состоит из нескольких параллельных проводников, причем витки этих проводников отделены друг от друга горизонтальными просветами. Благодаря такой конструкции каждый проводник соприкасается с маслом. Сжимные плиты (щеки) трансформатора сварные.

§ 13. Выводы концов обмоток трансформатора.

Внешние линии, подходящие к трансформатору и уходящие от него, соединяются металлически с концами первичной и вторичной обмоток обычно при помощи особых „выводов“. Только у сухих трансформаторов, т. е. не погруженных в масло, притом невысокого напряжения, концы обмоток непосредственно подводятся к зажимам, от которых начинаются линии. У масляных же трансформаторов концы обмоток проходят в особых трубках, иногда сложной конструкции, укрепленных в верхней крышке масляного бака. Эти трубки с проходящим в них проводом называют выводами. Та или иная степень сложности конструкции вывода зависит от величины напряжения обмотки трансформатора, иными словами от силы и распределения электрического поля, получающегося между проводником, проходящим через крышку бака, и стенками этой крышки.

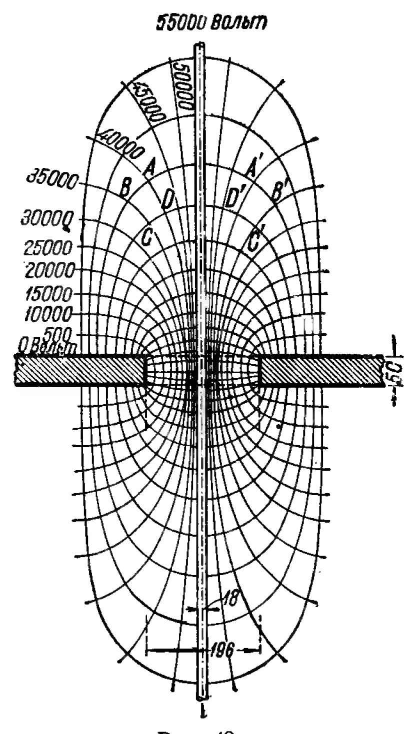


Рис. 42.

На рис. 42 расходящиеся радиально от проводника линии иллюстрируют распределение силовых линий электрического поля вокруг проводника, проходящего через стенку бака при условии, что между проводником и стенкою имеется воздух. Линии, перпендикулярные к силовым линиям поля, являются линиями уровней; вдоль этих линий напряженность в воздухе одна и та же. Эта напряженность, выраженная в вольтах на 1 *см*, дана на рис. 42 для вывода на 55 000 V. Из рисунка видно, что силовые линии электрического поля наиболее сильно сгущены в месте прохождения провода через крышку бака. В этом именно месте на слой воздуха шириною в 1 *см* действует наибольшее напряжение. Если это напряжение, называемое градиентом потенциала, превзойдет опреде-

ленную величину для воздуха (равную 30 kV/*см*), то воздух будет пробит и между проводом и крышкой получится разряд через воздух, т. е. воздух уже сделается проводником. Для того чтобы предотвратить разряды между крышкою и проводником, помещают изолятор с большею электрическою крепостью, т. е. с большим градиентом потенциала. В качестве такого изолятора может быть применен фарфор, бакелит, микартовые трубки и другие подобные материалы.

На рис. 43a, 43b и 43c изображены выводы, состоящие из фарфорового полого цилиндра, укрепленного в крышке бака, внутри которого проходит металлический стержень, соединенный с концом

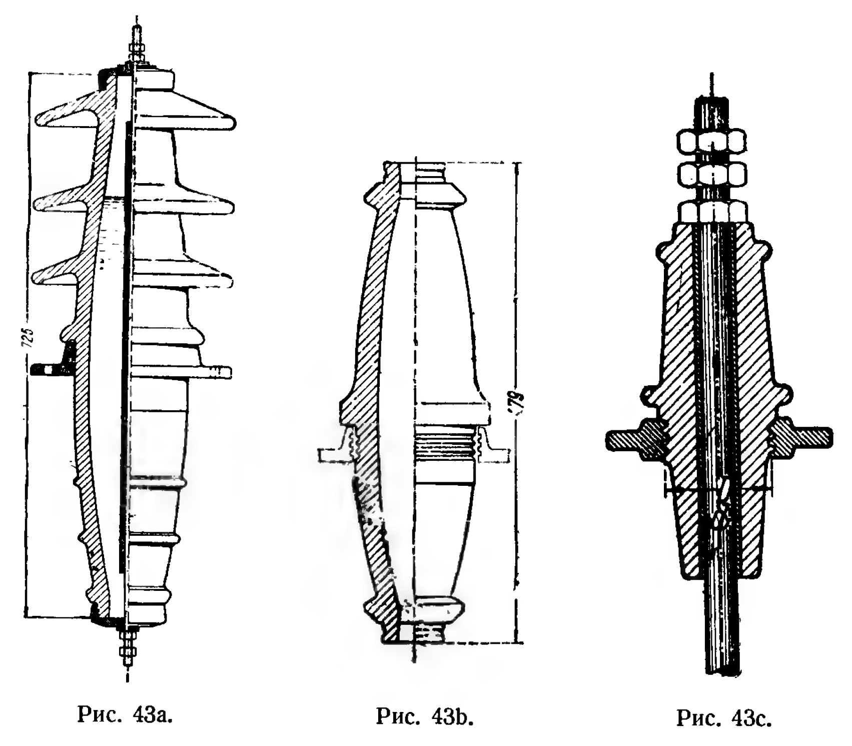


Рис. 43a. Рис. 43b. Рис. 43c.

обмотки трансформатора. Между фарфоровым цилиндром и стержнем залит изолирующий компаунд с большею электрическою крепостью, сравнительно с воздухом. Для того чтобы удлинить путь для поверхостного разряда (по высоте изолятора) наружная стенка вывода получает волнистую форму.

Фарфоровые изоляторы изображенного на рис. 43 типа, т. е. со сплошными стенками, применяются для напряжений 10—30 kV. При более высоких напряжениях конструкция выводов значительно усложняется.

Вообще говоря, вывод высокого напряжения должен удовлетворять следующим условиям. Он должен выдержать испытание на диэлектрическую прочность согласно нормам, установленным на этот предмет (см. Нормы ВЭС). Разрядное поверхностное его

напряжение должно быть ниже пробивного напряжения, т. е. он должен выдержать разрядное поверхностное напряжение, не будучи при этом пробит. Это условие приводит к тому, что при повышении напряжения выше нормального прежде всего происходит поверхностный разряд, и вывод защищается от пробивания. Само собою разумеется, разрядное поверхностное напряжение должно быть больше того, при котором испытывается диэлектрическая прочность вывода. Далее, вывод должен быть мало „податлив" к поверхностному разряду, т. е. „время отставания" его должно быть значительно больше, нежели разрядника, предохраняющего трансформатор от перенапряжения, ибо первым должен действовать разрядник. Наружная поверхность вывода должна быть свободна от явления короны при нормальном напряжении или при том, которое может часто иметь место в линии. Однако нет необходимости подавлять корону на металлическом конце вывода, ибо при короне происходит рассеяние энергии, что увеличивает время отставания поверхностного разряда. Корону внутри бака необходимо безусловно подавлять для того, чтобы не было возгорания смеси газов, могущей образоваться между поверхностью масла и крышкою.

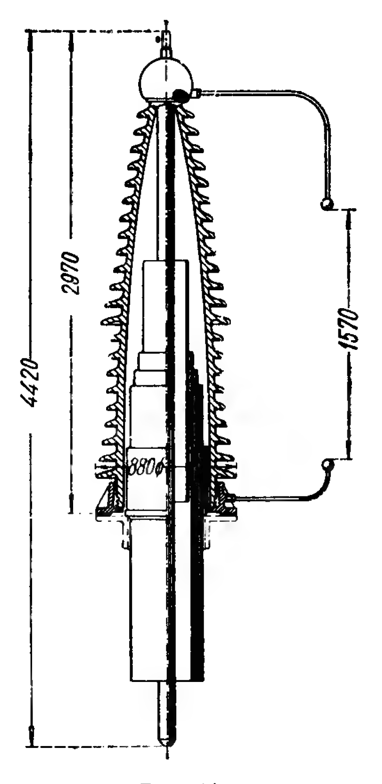


Рис. 44.

Изложенным требованиям в главных частях удовлетворяет такая конструкция вывода, при которой распределение потенциала по поверхности и по толщине вывода равномерное. Достигается это тем, что вывод фабрикуется не сплошным из одного сорта изоляции, а из ряда трубок разных изолирующих материалов и разных длин, вдвинутых одна в другую и образующих слоистую трубку конической формы с обоих концов. Если бы материал трубки был один и тот же, т. е. с неизменной диэлектрической постоянной, то напряженность его около проводника, где электрическое поле наиболее сильно (линии сил сгущены), была бы больше, нежели у стенки масляного бака, где поле значительно слабее. Беря материал с постепенно увеличивающейся, начиная от провода, диэлектрической постоянной, нетрудно получить одинаковую напряженность на пути от провода к стенке бака.

На рис. 44 изображен вывод, несколько отличающийся от описанного. У него все трубки, окружающие металлический сердечник, выполнены из бакелизированной бумаги или прессшпана, но вставлены одна в другую с цилиндрическим зазором. Трубки помещены в фарфоровый колпак, заполненный внутри маслом. Таким образом между стержнем и внутреннею стенкою фарфорового колпака по-

лучаются чередующиеся слои трубок и масла. Конец стержня, выходящий из фарфорового колпака, снабжен сферической шапкой, которая служит для более равномерного распределения силовых линий электрического поля, ибо острые грани стержня вызывают сгущение электрического поля, что может привести к коронированию. Ребра на наружной стенке фарфорового колпака имеют целью противодействовать поверхностному разряду.

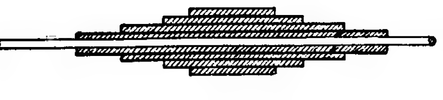


Рис. 45.

При очень высоких напряжениях (от 100 до 500 kV) применяются выводы так называемого конденсаторного типа.

Эти выводы состоят из ряда трубок, приготовленных из одного изолирующего материала, вдвинутых одна в другую, с прослойками между ними в виде тонкой металлической трубки (рис. 45). В таком виде вывод представляет собою ряд конденсаторов (две металлические трубки с прокладкою из изоляции — конденсатор), соединенных последовательно. Если взять емкости этих конденсаторов одинаковыми, что приблизительно будет при ревенстве $D_1h_1 = D_2h_2 = \ldots$, где D_1, $D_2 \ldots$ — диаметры, а h_1, $h_2 \ldots$ — высоты трубок, то напряжение, действующее на изоляцию, будет одинаково по всей толщине трубки. При этом и поверхностное распределение напряжения (или потенциала) будет также равномерное.

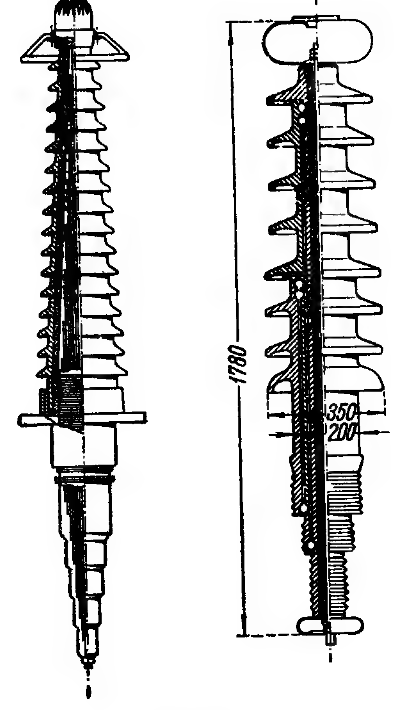


Рис. 46.

На рис. 46 изображены два вывода конденсаторного типа. В первом выводе (завода Сименс-Шуккерт) изоляционные трубки выполнены из бакелизированной бумаги; во втором выводе изоляционные трубки выполнены из фарфора, причем металлические прокладки между ними заменяют концентрические слои воздуха. Эти слои воздуха между фарфоровыми трубками уже при небольших напряжениях ионизируются, становятся, следовательно, проводящими токи и заменяют металлические прокладки конденсаторного вывода первого типа. Оба вывода на внешнем конце сердечника снабжены металлическими надставками, предназначенными для создания равномерных электрических полей в местах присоединения внешнего провода к сердечнику вывода (при острых углах получается неравномерное распределение электрического поля, что вызывает коронирование).

Завод G. El. C° (Дженераль Электрик Компани) в Америке,

тщательно разработавший конструкции и нормы выводов, одинаково пригодных как для силовых трансформаторов, так и для измерительных, а также для масляных выключателей и т. д., строит их двух типов: для напряжения до 75 kV — „сухие“, а для напряжений от 75 до 200 kV — „наливные“. Последние состоят из металлического среднего полого цилиндра и двух фарфоровых полых же вставок, нижней и верхней, с рифлеными поверхностями, скрепленных со средним цилиндром помощью фланцев. Напостредственно с одним из фланцев внутри вывода соединен тонкостенный металлический цилиндр с хорошо закрепленными кантами, выдвинутый на некоторую высоту фарфоровых частей. Внутри этого цилиндра и фарфоровых вставок помещаются концентрические трубки из изоляционного материала, и между ними помещаются металлические трубки. Все трубки располагаются концентрически на некотором расстоянии друг от друга; таким образом между ними остаются свободные каналы, заполняемые впоследствии маслом весьма высокого качества. Масло в данном случае берется, во-первых, потому, что оно обладает высокой диэлектрической стойкостью, во-вторых, потому, что оно служит средою, хорошо проводящей тепло, и в-третьих, потому, что оно легко вытесняет воздух из пор изоляции. Чтобы дать возможность маслу расширяться, в верхней части вывода имеется стеклянный сосуд, который служит вместе с тем и для наблюдения за маслом. Провод проходит через медную центральную трубку и через сосуд с маслом.

На величину разрядного поверхностного напряжения вывода большое влияние оказывает высота местности установки трансформатора над уровнем моря. Так, разрядное напряжение вывода 375 kV на уровне моря понижается до 330 kV — при высоте 1200 *м* и до 275 kV — при высоте 3000 *м* над уровнем моря. Пробивное напряжение не зависит от высоты местности; точно так же не зависит от нее напряжение для изоляции нижнего конца вывода, находящегося в масле. Таким образом, в общем, вывод для высоких местностей отличается от вывода для низких местностей большей высотой верхней (выступающей из бака) части, в виду понижения диэлектрической прочности разряженного воздуха.

На разрядное напряжение вывода оказывают влияние осадки влаги, понижая его до 70—90% от напряжения сухого вывода.

§ 14. Вопросы для самопроверки.

1. Каковы формы сечения меди, применяемой для трансформаторов?
2. Каковы типы обмоток, применяемых у трансформаторов?
3. Как выполняются цилиндрические и дисковые обмотки?
4. Для чего обмотки разбиваются на катушки?
5. Как изолируются друг от друга обмотки низшего и высшего напряжения?
6. Каковы типы выводов, применяемых у трансформаторов?

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ.

ОХЛАЖДЕНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ; КОНСЕРВАТОРЫ; ОСОБЕННОСТИ УСТРОЙСТВА ТРАНСФОРМАТОРОВ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ.

§ 15. Охлаждение трансформаторов.

Теплота, в которую превращается вся энергия потерь в железе и в меди трансформатора, тем или иным способом должна быть отведена от него, для того чтобы нагревы обмоток и сердечника не превосходили пределов, указанных в Нормах ВЭС по испытанию машин, т. е. тех пределов, выше которых изоляция обмоток начинает разрушаться и терять свои изолирующие свойства.

В отношении способа охлаждения трансформаторы разделяются на следующие группы: a) с естественным воздушным охлаждением, b) с форсированным воздушным охлаждением, c) с естественным масляным охлаждением и d) с форсированным масляным охлаждением.

Трансформаторы с воздушным охлаждением называются сухими; трансформаторы с масляным охлаждением — масляными.

Естественное воздушное охлаждение, при котором теплота отводится от нагретых частей трансформатора естественным потоком окружающего воздуха, является совершенно достаточным для трансформатора небольшой мощности (до 200—300 kVA) и невысокого напряжения. Так как у трансформаторов с дисковой обмоткой отдельные катушки — первичные и вторичные — одинаково доступны для воздуха, то условия естественного охлаждения их лучше, нежели у трансформаторов с цилиндрическою обмоткою, ибо внутренние обмотки мало доступны для воздуха.

Трансформаторы большой мощности с естественным охлаждением получаются слишком тяжелыми и дорогими. Если принять, что мощность, а следовательно и потери трансформатора возрастают пропорционально объему материалов, его составляющих, т. е. пропорционально третьей степени размеров, то охлаждающая поверхность возрастает пропорционально лишь второй степени размеров. Поэтому для получения определенной удельной поверхности охлаждения, т. е. поверхности, приходящейся на 1 W потерь, пришлось бы взять больший объем на 1 kW мощности.

Чтобы облегчить трансформатор и удешевить установку, применяют форсированное охлаждение воздухом, причем поступают двояко. Если устанавливается один-два трансформатора, то поток воздуха, создаваемый вентилятором, направляется к каждому трансформатору в отдельности; попадая в окружающий трансформатор кожух у основания, он проходит мимо катушек, а также по каналам в сердечнике и выходит через верхние отверстия в кожухе

(рис. 47). Применяя систему заслонок и клапанов, легко поток воздуха распределить так, чтобы железо и медь охлаждались равномерно, или так, как это требуется заданиями. Если же имеется несколько трансформаторов, и при том большой мощности, применяют другой способ: трансформаторы устанавливаются в особых камерах над каналом, в который непрерывно накачивается вентилятором свежий воздух. Этот воздух, проходя через отверстия у основания трансформатора, омывает его части и нагретым выходит в отдушины камеры. Количество охлаждающего воздуха зависит от условий охлаждения; в среднем можно считать, что на 1 kW потерь необходимо около 4 $м^3$ в минуту. Скорость движения воздуха в камере не более 2,5 *м* в секунду. Расход энергии на вентиляцию ничтожен, не более 0,1—0,3% мощности трансформатора; повышение же мощности трансформатора при форсированной тяге составляет приблизительно 60—70% от мощности при естественном охлаждении. Температура подводимого воздуха зависит от климатических условий; при расчетах она принимается равной 25° C. Нагрев воздуха составляет 12—20° C.

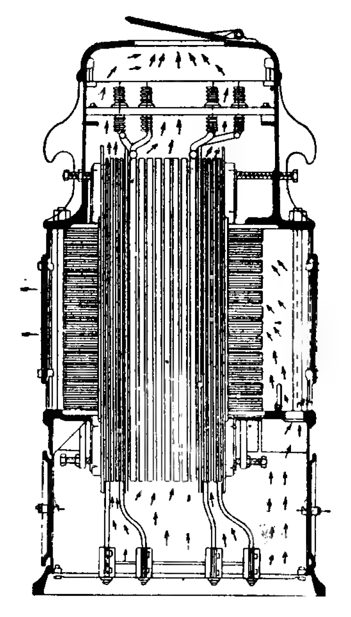


Рис. 47.

Трансформаторы с воздушным охлаждением не строятся на напряжение выше 35—40 kV.

Современные трансформаторы, в особенности большой мощности и высокого напряжения, охлаждаются большей частью (до 60%) при участии масла, которое одновременно служит и прекрасным изолирующим материалом. Само собой разумеется, для последней цели масло должно обладать вполне определенными изолирующими свойствами (см. далее) и в особенности оно должно быть свободно от влаги. Для целей же охлаждения масло должно быть легким, по крайней мере в нагретом состоянии, и должно свободно проникать в те каналы, которые делаются в обмотках и в сердечнике для облегчения циркуляции его и лучшего соприкосновения с более нагретыми частями. Кроме того, масло не должно разлагаться при нагреве и давать смолистые вязкие осадки на обмотках, затрудняющие теплообмен между медью и маслом и являющиеся причиною появления „горячих" мест в трансформаторе. Охлаждающее масло наливается в железный или чугунный бак (или танк), в который опускается затем трансформатор. Тепло обмоток и железа в первую очередь передается маслу, обладающему значительною теплоемкостью. Что касается охлаждения самого масла, то оно происходит или путем естественного теплообмена между стенками бака и окружающим воздухом, или же более форсированными способами. При естественном охлаждении масла бак должен иметь достаточную поверхность, чтобы окружающий воздух мог отводить необходимое

количество тепла. С целью увеличения поверхности охлаждения баки трансформаторов большой мощности изготовляются из волнистого железа или же снабжаются радиаторами в виде труб (рис. 48) или плоских камер (рис. 49), примыкающих к баку с одного конца у крышки, а с другого — у основания. Нагретое масло поднимается вверх и, как бы разливаясь, направляется вниз, проходя около стенок бака или же через только что упомянутые радиаторы, отдавая свое тепло воздуху.

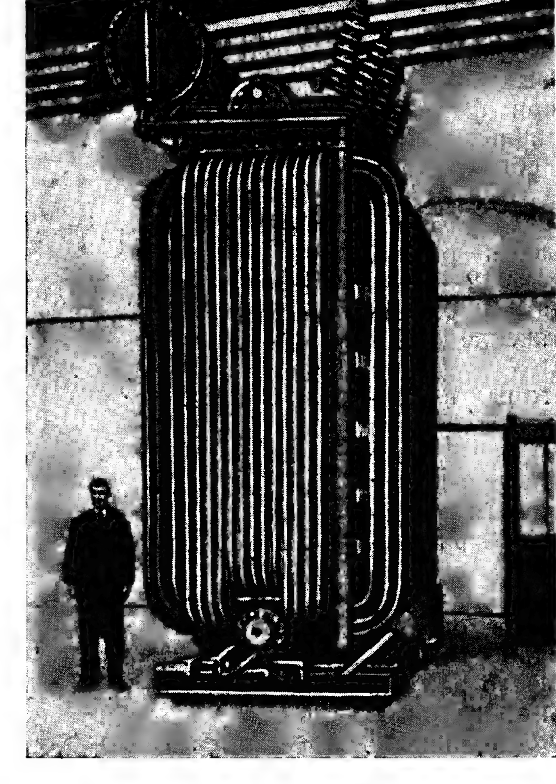


Рис. 48.

Для того чтобы усилить охлаждение масла в радиаторах, применяют форсированное воздушное охлаждение наружных стенок радиаторов. На рис. 50 изображен трансформатор 30000 kVA, 100 kV, у которого радиаторы обдуваются снизу воздухом, нагнетаемым показанным на рисунке вентилятором.

Завод G. El. C° в Америке применяет форсированное охлаждение радиаторов с помощью мелких струй воздуха, выходящего под большим давлением из отверстий трубок, размещенных вдоль радиаторов и выходящих из общего кольцевого резервуара с нагнетаемым в него воздухом.

На рис. 51 изображен трансформатор 30 000 kVA, 220 kV, с описываемым способом охлаждения. Струйки воздуха, направленные под некоторым углом к радиатору, форсированно снимают с его поверхности слой воздуха, чем облегчают приток и тесное соприкосновение со стенками радиатора свежего окружающего воздуха. Таким образом воздух, направляемый с большою скоростью на радиатор, играет в данном случае не столько роль охлаждающего элемента, сколько роль элемента, создающего около радиатора вихревое движение окружающего воздуха. Применение форсированного охлаждения радиаторов дает возможность повысить потери трансформатора, и, следовательно, поднять его мощность.

Форсированное охлаждение масла трансформатора воздухом выполняется часто другим способом. Нагретое масло бака центробежным насосом прогоняется через батарею труб, которые форсированно охлаждаются воздухом, нагнетаемым вентилятором. В этом случае бак уже не снабжается радиаторами, а получает простую конструкцию.

На рис. 52 изображен трехфазный трансформатор 40 000 kVA, 220/100/10,7 kV с внешним воздушным охлаждением масла.

На рис. 53 изображена открытая подстанция; слева видны воздушные охладители с проводящими масло трубами, в центре — трансформаторы с находящимися рядом масляными насосами и справа — масляные выключатели.

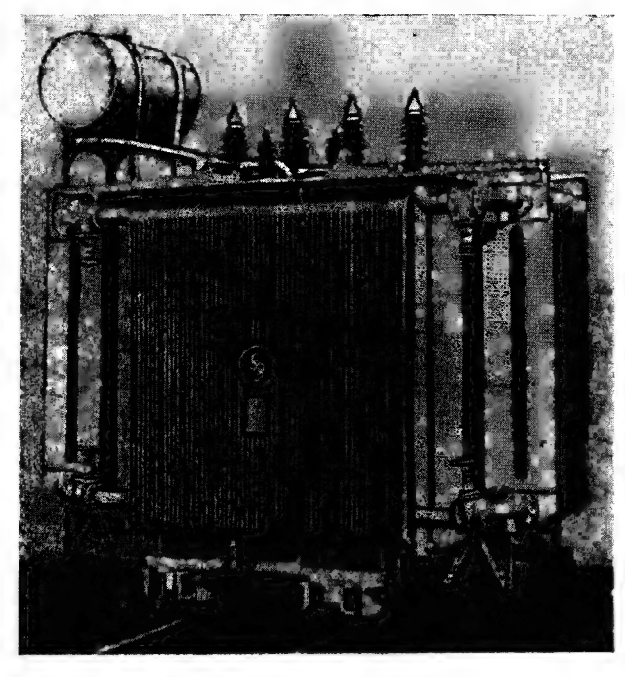


Рис. 49.

Форсированное охлаждение масла можно осуществлять также при помощи воды, в двух вариантах. По первому варианту в верхнюю часть бака с маслом и трансформатором опускается змеевик из железных или медных труб, через который непрерывно прогоняется свежая холодная вода (рис. 54). Охлажденное масло направляется вниз к трансформатору и вытесняет нагретое масло к змеевику.

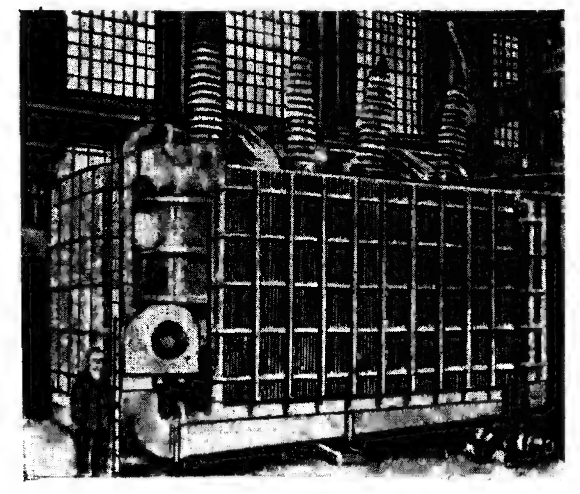


Рис. 50.

Для того чтобы вода из змеевика не могла попасть в масло, змеевик выполняется без паек и перед установкою испытывается на давление около 20 *am*.

Повышение температуры охлаждающей воды составляет около 10° С. Таким образом, если температура приходящей воды 15° С, то температура отходящей воды должна быть около 25° С. При таких условиях на 1 kW потерь требуется около

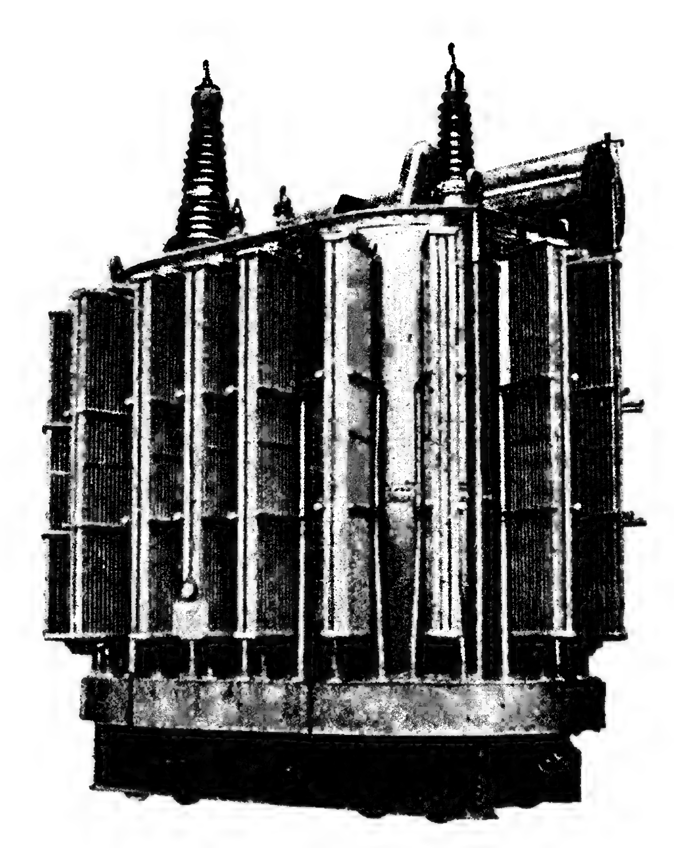


Рис. 51.

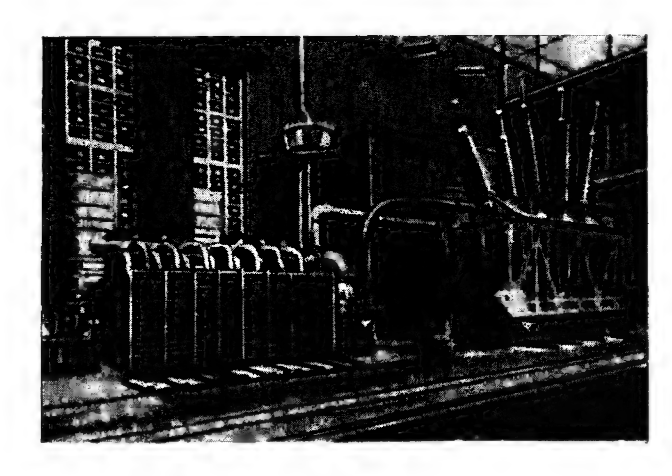


Рис. 52.

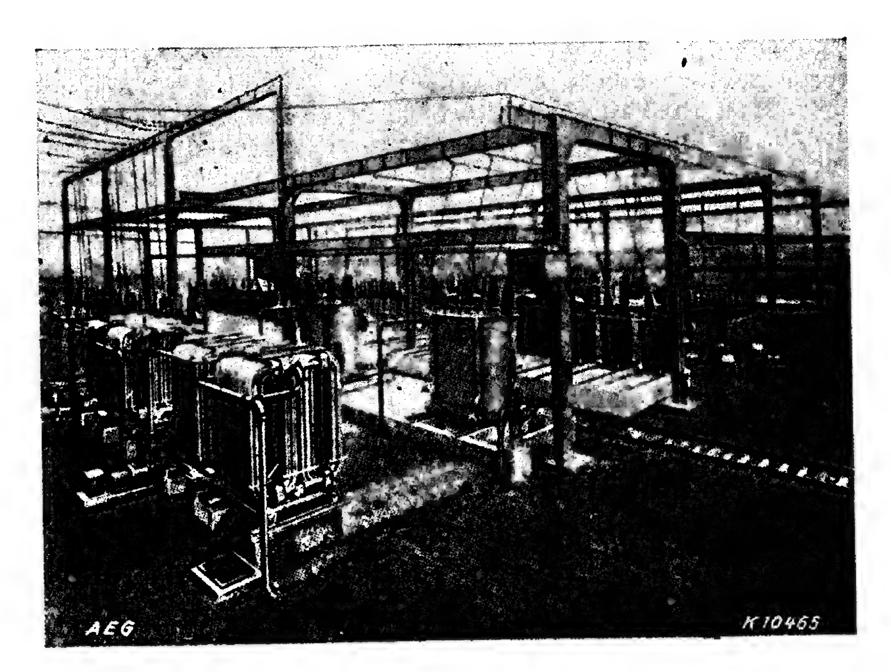


Рис. 53.

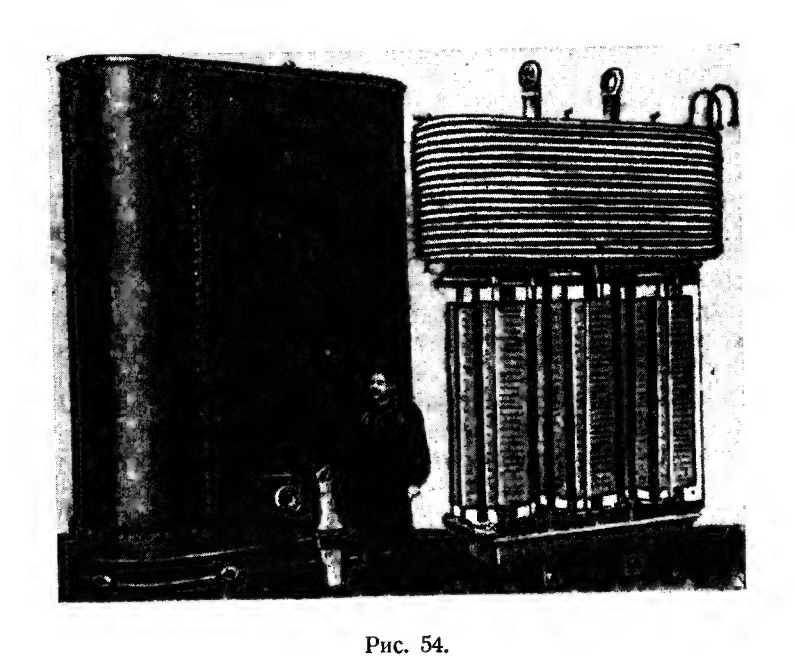


Рис. 54.

1,3—1,5 *л* воды. Скорость воды в змеевике около 0,5—2 *м*/сек.

Описанный способ охлаждения масла, в настоящее время почти не применяемый, практически осуществим лишь в местах, где имеется в достаточном количестве совершенно чистая вода, так как закупорка труб змеевика может вывести из действия трансформатор или, по крайней мере, заставить значительно понизить его мощность. В местах же, где имеющаяся в распоряжении вода не совсем чиста, охлаждение масла производится по второму варианту: масло из нижней части бака небольшим насосом прогоняется через змеевик, помещенный в сосуде с проточною водою, а затем обратно в бак, в его верхнюю часть. На рис. 55 изображена примерная установка с охлаждением масла водою вне трансформатора.

В тех случаях, когда трансформатор работает подолгу при неполной нагрузке, применяют комбинированное охлаждение масла:

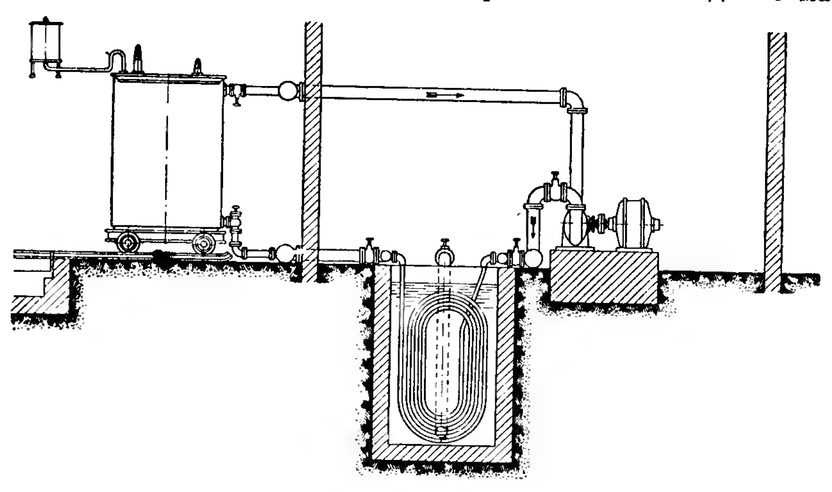


Рис. 55.

при неполной нагрузке, например при 50%, масло охлаждается естественной циркуляцией воздуха, при полной нагрузке — водою или воздухом. Само собою разумеется, в этом случае обязательны сигнальные устройства, отмечающие перегрев масла при естественном охлаждении. Такие же сигнальные устройства существуют, однако, в настоящее время почти на всех более или менее ответственных установках. На подобных установках имеются, кроме того, баки для хранения чистого масла и фильтры для очистки и осушки масла. Как только замечено потемнение масла (происходящее обычно от перегрева), тотчас же выпускают это масло из бака трансформатора и заменяют его чистым. Если же, вследствие разложения масла, на обмотках и змеевике получился смолистый осадок, то его снимают и затем «промывают» трансформатор маслом под давлением.

§ 16. Консерваторы.

Как было уже отмечено, влага в чрезвычайной степени понижает диэлектрическую прочность масла. Поэтому перед заливкою трансформатора как сам трансформатор, так и масло тщательно высушиваются (см. ниже). Однако „сухое" масло с течением времени становится „влажным". Дело в том, что все трансформаторы при изменении температуры как бы „дышат" — всасывают воздух при низшей температуре и выделяют его при высшей. В результате в масле конденсируется влага воздуха, которая особенно опасна, когда она сосредоточивается между катушками. Для ослабления конденсации влаги воздуха рекомендуется поддерживать трансформатор в нагретом состоянии (а масло никогда не держать при температуре ниже 10° С) или же совершенно уничтожать непосредственное соприкосновение масла в баке трансформатора с воздухом. Последний способ у современных трансформаторов высокого напряжения осуществляется путем снабжения последних так называемыми „консерваторами" (см. фиг. 48, 51 и 56).

Консерватор представляет собою небольшой вместимости бак с маслом, расположенный над главным баком и соединенный с ним тонкою трубкою (рис. 56). Благодаря повышенному расположению консерватора, поверхности масла в главном баке уже не имеется, она перемещается в консерватор. Сообщение внутреннего пространства консерватора с воздухом устанавливается через цилиндрический отросток, наполненный хлористым кальцием, отнимающим от воздуха его влагу. Остатки влаги, конденсируясь в масле консерватора, собираются в нижней его части, в колодце, откуда периодически выпускаются наружу через кран колодца. Соединение между обоими баками таково, что циркуляция масла между ними происходит медленно, и, следовательно, с воздухом в консерваторе соприкасается всегда более или менее охлажденное масло.

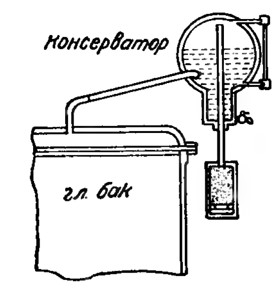


Рис. 56.

Объем консерватора должен быть таким, чтобы колебание уровня масла происходило только в нем самом и не выходило из определенных пределов. На рис. 56 указан примерный уровень масла в конденсаторе при работе трансформатора под нагрузкою, когда масло в баке сильно нагрето.

Помимо предохранения масла от влаги, консерваторы имеют и другие назначения. Они предотвращают взрывы смеси воздуха и газа, выделяемого маслом или под влиянием перегрева (при больших перегревах), или под влиянием статических разрядов у трансформаторов высокого напряжения: при наличии консерватора горячие пары масла, образующиеся внутри бака, поднимаются в консерватор, откуда через трубку могут, пройдя большой путь в масле и охладившись, выйти в атмосферу. Далее, консерватор защищает масло от загрязнения, являющегося следствием разложения его под влиянием кислорода воздуха и повышенной температуры. Наконец, консерватор защищает изоляцию от вредного действия на нее воздуха, ибо практикой доказано, что органические вещества, как то: бумага, фибра и др., разрушаются более медленно, когда в нагретом масле нет воздуха.

Консерватор устанавливается часто не на самом баке, а на

кронштейнах, вделанных в стенах трансформаторного помещения. На рис. 55 слева виден консерватор, установленный на кронштейнах и соединенный с баком трубкой, имеющей небольшое колено вблизи бака. Назначение этого колена заключается в том, чтобы воспрепятствовать воде, собравшейся на дне консерватора, попасть в бак трансформатора. При наличии колена вода может попасть в бак лишь только тогда, когда уровень ее будет выше перегиба колена, т. е. при таком количестве воды, которое не может быть не замечено.

Следует заметить, что если консерваторы могут предотвратить взрыв трансформатора при медленном образовании газа внутри бака, то они не в состоянии этого сделать при быстром образовании газа в большом количестве, когда давление в баке настолько повышается, что стенки бака могут разорваться. Такие случаи могут быть при образовании внутри масла достаточно мощной вольтовой дуги, например, от короткого замыкания при пробое изоляции

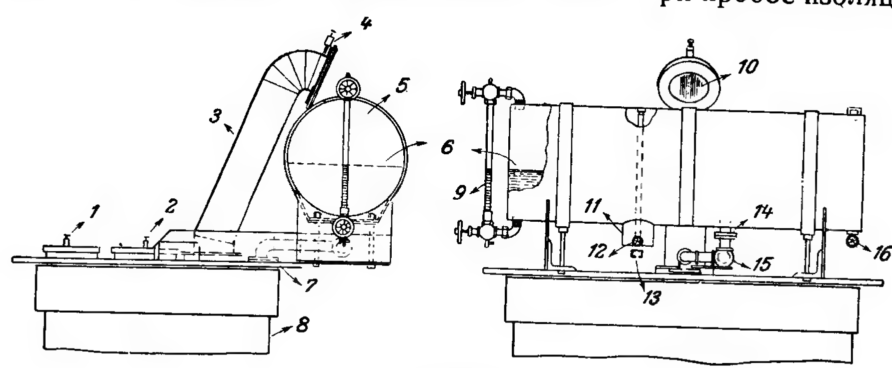


Рис. 57.

между катушками. Для того чтобы дать выход маслу в момент внезапного повышения давления внутри бака, трансформаторы большой мощности снабжаются в настоящее время не только консерваторами, но и особыми предохранительными клапанами. Такой клапан представляет собою железную трубу диаметром 20—25 *см*, один конец которой заделан в верхнюю крышку бака, а другой конец плотно закрыт стеклянной диафрагмой толщиною около 3 *мм*. Опыт показал, что эта диафрагма в состоянии выдержать ударную нагрузку около 7 $кг/см^2$, после чего уже лопается и не мешает выходу из бака масла и газа.

На рис. 57 приведен общий вид устройства с консерватором и предохранительной диафрагмой; на этом рисунке: *1* — воздушный кран во фланце ввода, *2* — воздушный кран в смотровой крышке, *3* — выпускная труба, *4* — воздушный кран, *5* — консерватор, *6* — уровень масла в консерваторе при 25° С, *7* — трубка, соединяющая консерватор с баком, *8* — бак трансформатора, *9* — указатель уровня масла в консерваторе, *10* — стеклянная диафрагма, *11* — водоотделитель, *12* — кран для выпуска воды, *13* — отверстие для воздуха, *14* — фланец, *15* — кран в соединительной трубе, *16* — кран для присоединения фильтр-пресса (маслоочистителя).

С той же целью предотвращения взрыва бака завод Вестингауз в Америке вводит под крышку бака нейтральный газ — азот, получаемый удалением кислорода из воздуха в особом приборе, имеющемся при трансформаторе. Назначение этого газа заключается, во-первых, в том, чтобы помешать окислению масла и образованию взрывчатого газа, и, во-вторых, в том, чтобы создать „газовую подушку“ для масла в момент повышения давления в баке. Опыты показали, однако, что газовая подушка у трансформатора хорошо действует при относительно небыстром нарастании давления и хуже, чем диафрагма при быстром нарастании давления. Завод G. El. C° построил несколько трансформаторов, которые одновременно снабжены консерватором, диафрагмой и газовой подушкой.

§ 17. Трансформаторное масло.

Современные масляные трансформаторы заливаются исключительно минеральными маслами, получающимися как продукт переработки нефти. Растительные масла для трансформаторов не применяются, в виду их неустойчивости (разложения) при высоких нагревах.

Масло масляного трансформатора служит не только для улучшения охлаждения, но и для повышения прочности изоляции трансформатора. Обладая само высокою диэлектрическую прочностью, оно повышает диэлектрическую прочность изолирующих материалов трансформатора, проникая во все поры их и вытесняя из них воздух и частично влагу. Вместе с тем оно предохраняет изоляцию от проникновения в нее влаги из воздуха. На этом основании некоторые заводы для масляных трансформаторов берут иногда изоляцию более низкого качества, чем для сухих трансформаторов. Соответственно двоякой роли трансформаторное масло должно обладать и надлежащими свойствами. Как охлаждающая среда, масло должно быть, во-первых, легким, по крайней мере при температуре эксплоатации трансформатора (около 80—90° С), во-вторых, свободно проникающим во все каналы между обмотками и в поры изоляции, обеспечивая при этом лучшую теплоотдачу циркуляцией. Для того чтобы способность к циркуляции или текучесть масла не уменьшалась при продолжительном употреблении, оно не должно легко окисляться и выделять при этом уплотненный осадок, состоящий, главным образом, из смол. Этот осадок может появиться или на обмотках, закупоривая каналы, или на змеевиках с охлаждающей водою, ухудшая теплоотдачу между водою и маслом. Таким образом содержание смолы в масле должно быть наименьшим, не более 0,3% — у масла, не бывшего в употреблении. Следует отметить, что и лучшее рафинированное минеральное масло окисляется с течением времени, и тем в большей степени, чем выше температура и чем теснее масло соприкасается с воздухом. Поэтому необходима периодическая очистка масла.

Во избежание катастрофических возгораний масла при работе трансформатора под нагрузкою, оно должно обладать „температурой воспламенения“, значительно превышающей температуру, до которой допускается нагрев масла при работе (обычно не выше

95° C). Под температурою воспламенения масла подразумевается такая наинизшая температура, при которой пары масла, поднимающиеся с поверхности, способны воспламениться, не давая длительного огня, ибо при этой температуре масло еще не может гореть. Та температура, при которой масло может уже само гореть, называется температурою горения. Температура воспламенения обыкновенного трансформаторного масла 180—200° С; более легкого и светлого 130—150° С. Температура горения выше температуры воспламенения на 20—30° С. Разность этих температур зависит от сорта масла. В таблице 5 приведены характеристики двух сортов трансформаторного масла *А* и *Б*

Масло сорта *А*, хотя и обладает высокими температурами воспламенения и горения, тем не менее хуже сорта *Б*, так как при продолжительном нагреве способно давать осадки как на дне бака, так и на обмотках и змеевиках с водою. Масло сорта *Б* — легкое, светлое минеральное масло — обладает низшими температурами воспламенения и горения, но меньше разлагается при длительном нагреве и нуждается в очистке раза в два реже, нежели масло сорта *А*. Поэтому-то оно чаще и употребляется для трансформаторов с охлаждением масла змеевиками с водой.

ТАБЛИЦА 5.

Характеристики	Сорт *А*	Сорт *Б*
Температура воспламенения	188° С	133° С
Температура горения	210° С	146° С
Температура замерзания	—10° С	—16° С
Текучесть	100—105	40—42
Удельный вес при 15,5° С	0,868	0,850
Цвет	темноянтарный	светлоянтарный

Как среда изолирующая, масло должно обладать надлежащею диэлектрическою прочностью. Эта прочность определяется величиною пробивного напряжения, действующего между двумя электродами той или иной формы, находящимися в масле. Считается, что чистое сухое трансформаторное масло должно противостоять по крайней мере напряжению в 22 kV, действующему между дисками диаметром 25,4 *мм*, раздвинутыми на расстояние 2,54 *мм*. Согласно нормам ВЭС пробивное напряжение масла не должно опускаться ниже:

a) 12 kV — для трансформаторов на напряжение до 40 kV;
b) 17 kV — для трансформаторов на напряжение выше 40 kV.

Согласно нормам Союза германских электротехников пробивное напряжение масла не должно быть ниже напряжения 40 kV, действующего между металлическими шариками диаметром 12,5 *мм*, раздвинутыми на расстояние 5 *мм*. Влияние влажности на диэлектрическую прочность сухого масла весьма велико; например, влажность 0,05% понижает диэлектрическую прочность сухого масла почти на 50%; однако увеличение влажности сверх 0,05% уже мало понижает далее диэлектрическую прочность масла. Всякие механические примеси, даже микроскопические волокна, которые не могут

быть удалены обыкновенными фильтрами, значительно понижают диэлектрическую прочность, ибо эти волокна образуют как бы мостики между электродами, через которые и происходит пробивание масла. Действие влажности отчасти и заключается в том, что волокна, сделавшись влажными, оказывают меньшее сопротивление пробивному напряжению. Полное удаление механических примесей, хотя бы помощью коллоидного фильтра, и применение химически чистых сосудов ведет к значительному увеличению диэлектрической прочности масла. Лучшее средство обнаружения влаги в масле — периодическое испытание его на пробивание, для чего пробы масла рекомендуется брать со дна бака, где преимущественно скопляется влага вследствие своего высокого удельного веса. В том случае, когда не имеется под рукою необходимых для испытания на пробивание приборов, можно пользоваться для той же цели следующим способом. В колбочку с пробой масла следует прибавить немного безводной сернокислой соли (безводного медного купороса) и хорошо взболтать. Если в масле имеется влага, то раствор делается заметно синим; если окрашивания не будет, то это укажет на то, что изолирующие свойства масла достаточно высоки. При грубых исследованиях пользуются иногда накаленною железною проволокою, которая, будучи опущена во влажное масло, издает своеобразный треск. Такой же треск получается и при кипячении влажного масла в фарфоровой чашке.

Для устранения влаги из масла, или просушки его, существуют следующие способы: 1) отстой в сосудах, 2) фильтрация через некоторые вещества, пропускающие воду и задерживающие масло, 3) продолжительный нагрев при 105—110° С (способ, ухудшающий масло, вследствие его разложения), 4) нагрев в разреженном пространстве (способ, требующий дорогих устройств, но не имеющий последствий предыдущего способа), 5) процеживание масла под некоторым давлением через обыкновенную фильтровальную бумагу, обладающую своеобразным свойством пропускать масло и задерживать до последнего следа влагу, а также возможные механические примеси (за исключением микроскопических). Особенное внимание в этом способе обращается на подготовку фильтровальной бумаги, которая предварительно высушивается при температуре не свыше 85° С (в течение по крайней мере 24 часов) в особой электрической печи и пропитывается сухим, легким маслом. Последний способ просушки масла часто встречается на современных установках большой мощности. Не менее часто встречается способ просушки масла путем нагрева при определенном вакууме. Для этой цели на больших установках имеются особые цилиндрические баки, тогда как на небольших установках обходятся баками из-под самих трансформаторов. Масло после продолжительного (около двух месяцев) отстоя и фильтрации наливается в бак так, чтобы оно лишь на несколько сантиметров не доходило до крышки, ибо крышка должна быть достаточно нагрета во избежание конденсации ею влаги. Нагрев в течение 12 часов при температуре 80° С и вакууме 50 *см* достаточен для хорошей просушки масла. Самый нагрев масла осуществляется при помощи змеевика с циркулирующим по нему паром или помощью реостата с электрическим

током; и змеевик и реостат помещаются при этом на дне бака. После просушки масло тотчас же выливается в бак с просушенным заранее трансформатором.

За последние годы большие успехи сделаны в отношении обезвлаживания масла помощью сепараторов. Применение сепараторов в значительной степени ускоряет осушку масла и уменьшает стоимость самого процесса осушки. Аппарат, которым при этом пользуются, состоит из приводимого эликтрическим двигателем в движение центробежного сепаратора, насоса, подогревателя и бака для масла. Все эти части монтированы на подвижной тележке.

Одновременно с просушкой масла при первой установке трансформатора необходимо просушить также и самый трансформатор. Существует несколько способов просушки трансформатора. Самым распространенным способом является просушка с помощью короткого замыкания в течение продолжительного времени с таким расчетом, чтобы приходящие по обмоткам токи нагрели их приблизительно до 80° С. Эти токи, в зависимости от температуры окружающего воздуха и конструкции трансформатора, составляют обычно от $^1/_3$ до $^1/_5$ нормальных их значений при полной нагрузке; для получения их необходимо приложить к одной из обмоток напряжение от 0,4 до 1,5% нормального напряжения для этой обмотки. Температура обмоток определяется при этом или по увеличению сопротивления их (см. далее), или помощью спиртового термометра, вдвинутого между катушками обмотки низшего напряжения (как имеющей более тонкий слой изоляции) по возможности ближе к проводникам. Чтобы просушка обмоток шла более интенсивно, желательно создать около трансформатора хорошую циркуляцию воздуха. Время, необходимое для полной просушки обмоток трансформатора, зависит от условий просушки, мощности и напряжения его, а потому не может быть заранее точно определено. В таблице 6 приведены приблизительные значения длительности просушки трансформаторов разной мощности, при различных напряжениях.

ТАБЛИЦА 6.

Напряжение kV	Мощность трансформатора kVA	Длительность просушки часы
22—33	200 и выше	38
	500—1 000	48
	1 000—2 000	60
	выше 2 000	72
33—44	200—500	52
	500—1 000	64
	1 000—2 000	72
	выше 2 000	84
44—66	200—500	64
	500—1 000	72
	1 000—2 000	84
	выше 2 000	92
66—88	1 000—2 000	96
	выше 2 000	118
88—100	выше 2 000	130

В том случае, когда на месте установки не имеется источника тока, просушка обмоток трансформатора осуществляется продуванием через трансформатор, помещенный в свой бак без масла, воздуха, нагретого приблизительно до 100—105° С. Нагретый воздух поступает при этом в отверстие у дна бака (служащее для стока масла) и выходит наружу через слегка приоткрытую крышку. Процесс просушки трансформаторов средней мощности длится до трех дней.

§ 18. Особенности устройства трансформаторов высокого напряжения.

Трансформаторы высокого напряжения можно разбить на две группы: на трансформаторы промышленного типа, т. е. такие, которые уже установлены и непрерывно эксплоатируются на электропередачах при наивысшем пока напряжении 220 kV, и на испытательные трансформаторы, предназначенные для лабораторных исследований и, следовательно, работающие периодически.

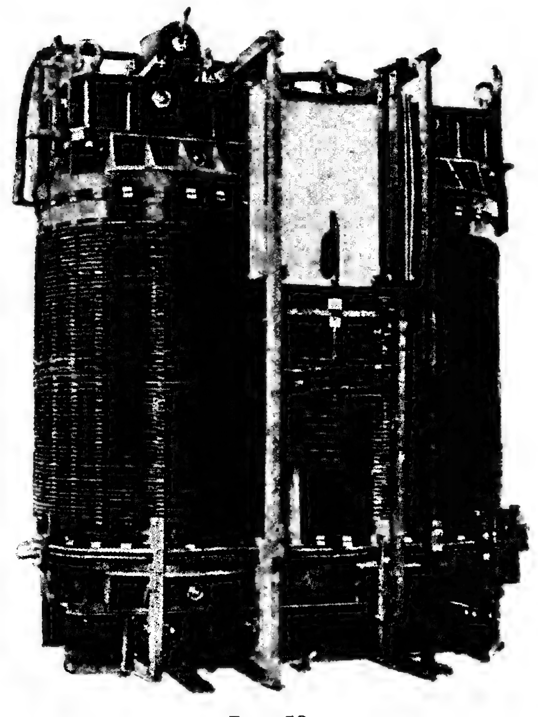


Рис. 58.

В качестве примера промышленного трансформатора высокого напряжения можно привести однофазный трансформатор мощностью 25 000 kVA, построенный заводом G. El. C° и работающий при линейном напряжении трехфазной линии передачи 220 kV (рис. 58). Трехфазный ток трансформируется тремя такими трансформаторами, соединенными звездою при заземленной нейтрали. Таким образом каждый трансформатор дает напряжение $220\,kV : \sqrt{3} = 127$ kV, но изоляция обмотки высшего напряжения рассчитана на 220 kV. Трансформатор, построенный заводом G. El. C°, принадлежит к типу стержневых трансформаторов с концентрическими обмотками. Обмотка высшего напряжения, расположенная снаружи, состоит из большого числа дисковых катушек, уложенных на стержнях с необходимыми зазорами для охлаждения. Катушки обоих стержней соединены между собою зигзагообразно, как указано на рис. 59, причем начальные катушки, от которых взят вывод, расположены посредине, а концы обмотки заземлены (см. также рис. 58). Таким образом средние катушки должны иметь

усиленную изоляцию, тогда как крайние катушки такой усиленной изоляции могут и не иметь, так как их потенциал относительно земли невысокий. Последнее обстоятельство значительно облегчает солидное укрепление крайних катушек у ярма против механического разрушения при коротких замыканиях. Наличие одного лишь вывода высокого напряжения значительно упрощает всю конструкцию трансформатора.

Охлаждение трансформатора производится при посредстве масла, причем масло охлаждается циркуляцией в радиаторах масляного бака, охлаждаемых воздухом, выходящим под сильным давлением из отверстий, расположенных около них трубочек (см. рис. 51, на котором изображен трансформатор мощностью 30 000 kVA, работающий при напряжении 220 kV).

В качестве примера испытательных трансформаторов весьма высокого напряжения можно привести испытательные трансформаторы, построенные заводами Вестингауз и Броун-Бовери.

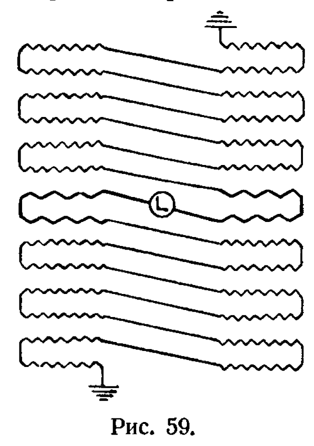
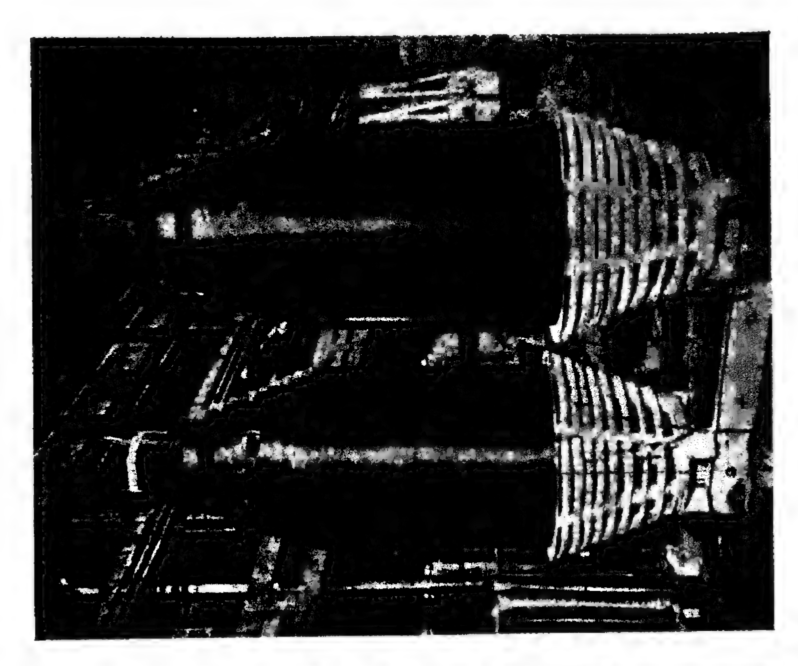


Рис. 59.

Испытательный трансформатор, построенный заводами Вестингауз в Америке, мощностью 1000 kVA при напряжении 1000 kV, изображен на рис. 60. Этот трансформатор принадлежит к типу стержневых трансформаторов. Первичная обмотка на 5000 V расположена непосредственно на сердечниках, вторичная же обмотка составлена из 34 катушек, имеющих разные длины и разные диаметры. Длинные катушки находятся ближе к сердечнику и, будучи заземлены, имеют потенциал, близкий к потенциалу корпуса, а потому имеют относительно слабую изоляцию. По мере удаления от сердечника длина катушек уменьшается, а диаметр их увеличивается; усиливается одновременно и изоляция катушек, так как потенциал их относительно земли возрастает. Катушки вставлены одна в другую, чередуясь с цилиндрическими манжетами из изоляционного материала (герколит). Катушки обоих стержней соединены зигзагообразно, т. е. катушка одного стержня соединяется с катушкой другого стержня и т. д. Размеры катушек таковы, что поверхности их почти одинаковы. Благодаря такому устройству вторичной обмотки, распределение напряжения изоляции от сердечника к наружной поверхности обмотки получается более или менее равномерным. В этом отношении обмотка напоминает по своему устройству конденсаторный вывод (см. рис. 45), причем медь каждой катушки играет роль обкладки конденсатора.

Испытательный трансформатор завода Броун-Бовери устроен следующим образом (см. рис. 61). На обычный железный сердечник надвинуты два цилиндра *b* и *c* из изоляционной массы, укрепленные в днище *d* и прикрытые сверху крышкою *e*. Кольцевое пространство между этими цилиндрами залито маслом. На внутреннем изоляционном цилиндре расположена обмотка низшего напряжения *f*; ближе к наружному изоляционному цилиндру находится



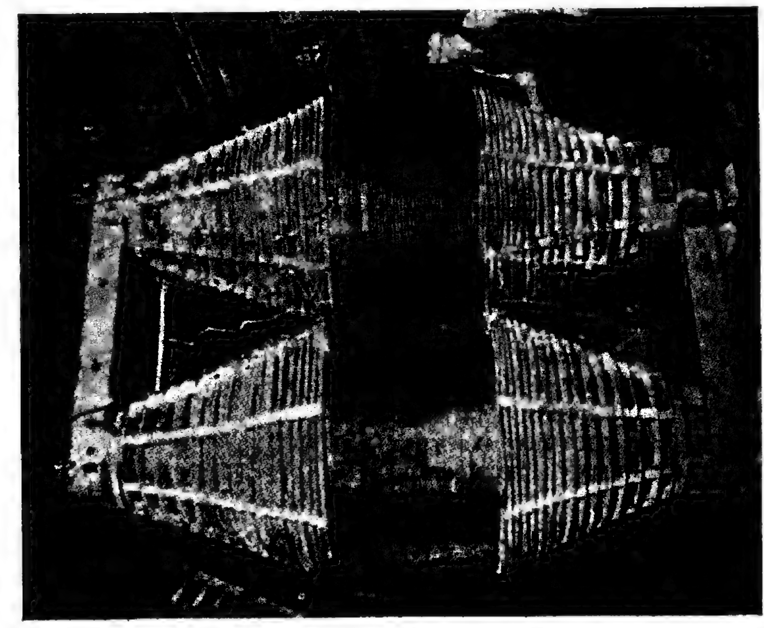


Рис. 60.

обмотка высшего напряжения. Последняя обмотка составлена из двух отдельных катушек. Наружные концы этих катушек соединены с железом, т. е. имеют потенциал корпуса, а концы у середины обмотки соединены с выводом h. Таким образом от середины обмотки высшего напряжения потенциал постепенно убывает к крышке и днищу цилиндров с маслом.

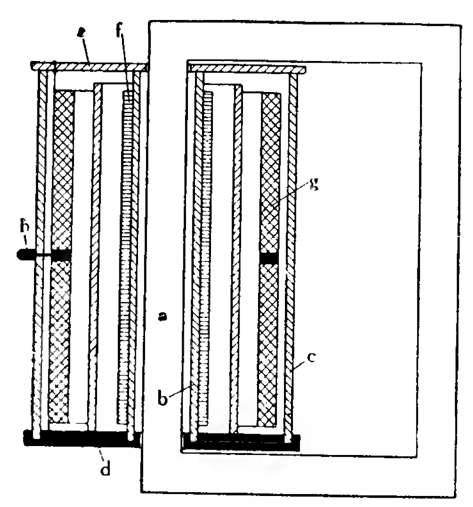


Рис. 61.

На рис. 62 изображен испытательный трансформатор на 750 kV мощностью 500 kVA, построенный заводом Броун-Бовери. Один полюс его может быть заземлен, но может быть и изолирован. Напряжение регулируется вспомогательным трансформатором.

Здесь уместно отметить, что весьма высокие напряжения для исследовательских работ, порядка 1000 kV и выше, получаются часто путем каскадного включения трансформаторов высокого напряжения по методу Дессауэра. Этот метод заключается в том, что напряжение от некоторой части вторичной обмотки одного трансформатора выполняемой из провода большего сечения, подводится к первичной обмотке следующего трансформатора и т. д. Главные же части вторичных обмоток всех трансформаторов соединяются последовательно, причем у каждого трансформатора наружу выводится только один конец обмотки высшего напряжения, а другой ее конец соединяется с корпусом трансформатора.

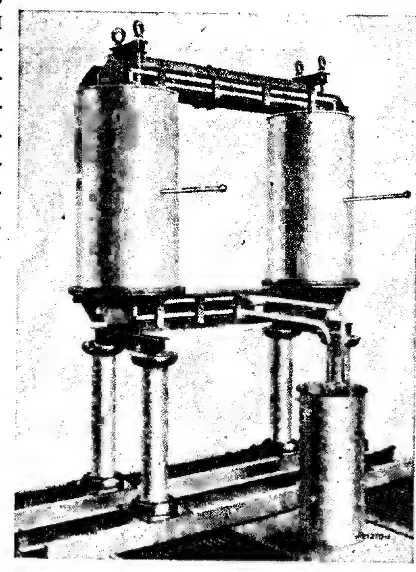


Рис. 62.

На рис. 63 изображена схема включения двух групп трансформаторов для получения напряжения 2100 kV. Каждая группа состоит из трех каскадно-соединенных трансформаторов: два из этих трансформаторов имеют ту особенность, что первичная обмотка их состоит из двух параллельно соединенных катушек A_1 и A_2, наложенных равномерно на сердечник броневого типа (рис. 64); точно так же и вторичная обмотка состоит из двух частей B и C, из которых часть C покрывает только обмотку A_2 и, следовательно, с нею тесно связана электромагнитно, а часть B покрывает

преимущественно обмотку A_1 и более тесно связана именно с нею. Благодаря такому расположению, первичная обмотка A_2 в обмотке B индуктирует небольшую электродвижущую силу, примерно 50 kV; обмотка же A_1 индуктирует в обмотке B электродвижущую силу 300 kV (общее напряжение трансформатора 350 kV). С

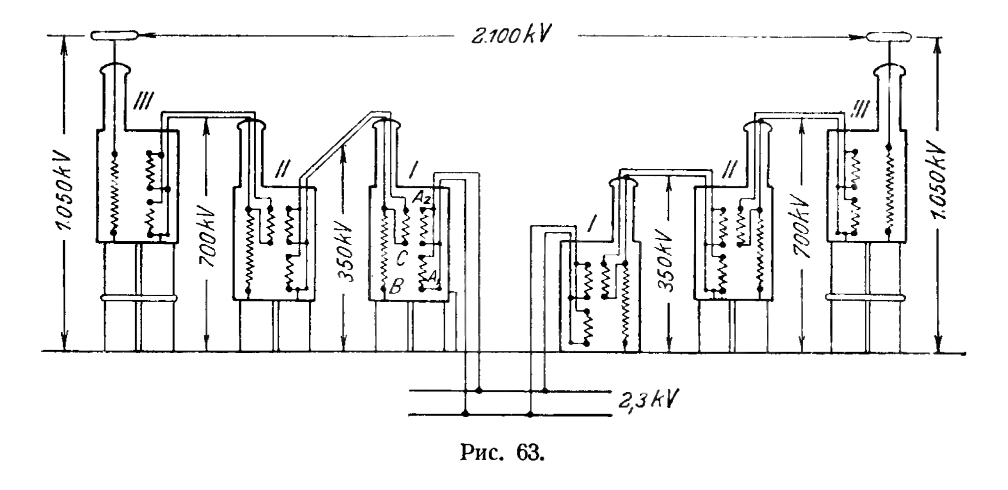


Рис. 63.

другой стороны обмотка A_2, будучи тесно связана с обмоткою C, передает ей мощность, необходимую для второго трансформатора.

На рис. 63 корпусы первых трансформаторов, соединенных с первичною цепью с напряжением 2,3 kV, заземлены; так как одни концы обмоток высшего напряжения B тех же трансформаторов соединены с корпусом, то и их потенциал равен потенциалу земли. Вторые концы обмоток высшего напряжения первых трансформаторов через обмотки A_1 соединены с корпусами вторых трансформаторов. Следовательно, потенциал корпусов вторых трансформаторов относительно земли будет равен 350 kV. Корпусы третьих трансформаторов также соединены с одними концами обмоток высшего напряжения вторых трансформаторов. Следовательно, их потенциал относительно земли будет равен уже $2 \cdot 350 = 700$ kV. Такие высокие потенциалы корпусов вторых и третьих трансформаторов требуют опор с соответствующею степенью изоляции.

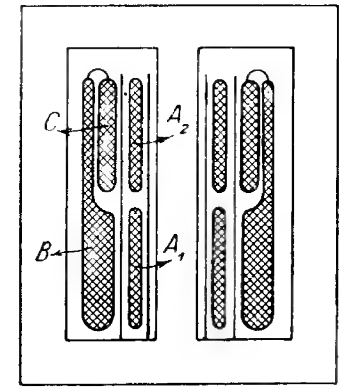


Рис. 64.

Крайние трансформаторы имеют одну лишь обмотку высшего напряжения, один конец которой соединен с корпусом трансформатора, а другой — выведен наружу в виде вертикального металлического штока, соединенного с защитной катушкой самоиндукции. Эта катушка, шунтированная радиально-соединенными корборундовыми сопротивлениями, служит для защиты трансформатора от перенапряжения и подавления колебаний высокой частоты. Внеш-

ний виток катушки переходит в полое алюминиевое кольцо с наружным диаметром около 2 *м*, служащее для катушки защитою от короны.

§ 19. Вопросы для самопроверки.

1. Каковы способы охлаждения трансформаторов?
2. Каковы преимущества масляных трансформаторов перед воздушными?
3. Как охлаждается масло трансформаторов?
4. Для чего применяются консерваторы у трансформаторов?
5. Каковы главнейшие свойства трансформаторного масла?

ГЛАВА ПЯТАЯ.

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ВХОЛОСТУЮ.

§ 20. Электродвижущие силы обмоток однофазного трансформатора.

Рассматривая принцип действия однофазного трансформатора, мы видели, что пульсирующий магнитный поток индуктирует в первичных и вторичных обмотках электродвижущие силы, мгновенные значения которых определяются выражением

$$e = -w\frac{d\Phi_t}{dt}\cdot 10^{-8} \text{ вольт.}$$

Рис. 65.

В этом выражении w — число витков той или иной обмотки, а $\frac{d\Phi_t}{dt}$ — изменение пронизывающего обмотки магнитного потока Φ_t за время dt. При этом предполагается, что все витки w полностью пронизываются магнитным потоком.

Предположим, что напряжение V_1, приложенное к первичной обмотке трансформатора (рис. 65), меняется во времени по закону синуса, т. е. его кривая изменения во времени есть синусоида; на рис. 66b синусоида *1*.

Так как электродвижущая сила первичной обмотки почти уравновешивает приложенное напряжение в любой момент времени, то мы должны сказать, что и первичная электродвижущая сила меняется во времени по закону синуса, т. е. ее кривая изменения во времени есть также синусоида; на рис. 66a синусоида *2*. Если за начало времени мы будем считать момент перехода электродвижущей силы через нуль, то мгновенное значение ее в какой-то момент времени t будет определяться выражением (см. рис. 66b)

$$e_1 = \sqrt{2}\,E_1 \sin \omega t.$$

В последнем выражении E_1 и $\sqrt{2}E_1$ — соответственно действующее и наибольшее (амплитудное) значения первичной электродвижущей силы, а ω — угловая частота изменения приложенного к первичной обмотке напряжения V_1.

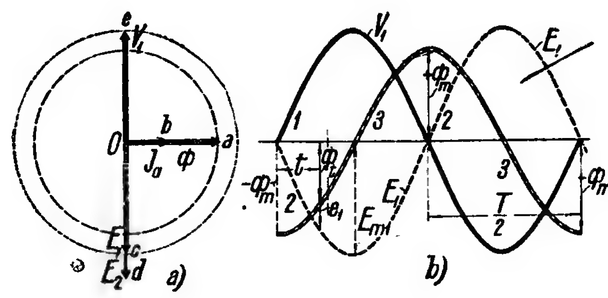


Рис. 66.

Угловая частота

$$\omega = 2\pi f,$$

где f — частота приложенного напряжения в герцах.

Но если первичная электродвижущая сила должна меняться по закону синуса, то и индуктирующий ее магнитный поток должен меняться также по закону синуса. Мгновенное значение этого потока в момент времени t можно определить из выражения

$$\Phi_t = \int d\,\Phi_t,$$

подставляя в него вместо $d\Phi_t$ равную ему величину $-\frac{e_1 dt}{w_1}$ из выражения для электродвижущей силы. Следовательно

$$\Phi_t = \int d\,\Phi_t = \int -\frac{e_1 dt}{w_1} = -\frac{\sqrt{2}\,E_1}{w_1}\int \sin\omega t\,dt,$$

откуда

$$\Phi_t = \frac{\sqrt{2}\,E_1}{\omega_1 w_1}\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right).$$

Из полученного выражения следует, что

> **магнитный поток трансформатора меняется во времени по закону синуса, с той же частотою, что и электродвижущая сила, но опережает ее на $\frac{\pi}{2}$, или на 90°, т. е. на одну четверть периода.**

На рис. 66b синусоида *3* изображает изменение магнитного потока во времени. Эта кривая смещена в сторону опережения относительно кривой электродвижущей силы на $^1/_4$ периода и в сторону отставания на $^1/_4$ периода относительно напряжения. В векторном изображении синусоидально-меняющихся величин это обстоятельство учитывается тем, что вектор потока смещается в сторону опережения на 90° относительно электродвижущей силы и в сторону отставания на 90° относительно напряжения (см. рис. 66a).

Наибольшая величина или амплитуда магнитного потока, как это следует из выражения для мгновенного его значения, будет

$$\Phi_m = \frac{\sqrt{2} E_1}{w_1 \omega} 10^8 = \frac{\sqrt{2} E_1}{w_1 2\pi f} 10^8 = \frac{E_1}{4{,}44 f w_1} 10^8.$$

Из последнего равенства мы можем получить действующее значение электродвижущей силы, выраженной через амплитуду магнитного потока, а именно

$$E_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w_1 \Phi_m \cdot 10^{-8} = 4{,}44 f w_1 \Phi_m \cdot 10^{-8} \text{ вольт}$$

Так как электродвижущая сила во вторичной обмотке трансформатора индуктируется тем же магнитным потоком, что и электродвижущая сила в первичной обмотке, то можно сказать, что и вторичная электродвижущая сила меняется во времени по закону синуса. Действующее значение ее определится выражением

$$E_2 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w_2 \Phi_m \cdot 10^{-8} = 4{,}44 f w_2 \Phi_m \cdot 10^{-8} \text{ вольт}$$

Коэфициент трансформации

$$u = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}.$$

Пусть, например, наибольшее значение магнитного потока трансформатора $\Phi_m = 0{,}8 \cdot 10^6$ максвелл, а число витков первичной и вторичной обмоток $w_1 = 5630$ и $w_2 = 118$. Определим электродвижущие силы E_1 и E_2 при частоте $f = 50$ Hz.

По вышеполученным формулам имеем:

$$E_1 = 4{,}44 \cdot 50 \cdot 5630 \cdot 0{,}8 \cdot 10^6 \cdot 10^{-8} = 10\,000 \text{ V};$$

$$E_2 = 4{,}44 \cdot 50 \cdot 118 \cdot 0{,}8 \cdot 10^6 \cdot 10^{-8} = 210 \text{ V}.$$

Коэфициент трансформации

$$u = \frac{E_1}{E_2} = \frac{10\,000}{210} = 47{,}5.$$

Действующие значения электродвижущих сил E_1 и E_2 можно еще определить через средние их значения и через коэфициент формы кривой электродвижущих сил. Если $+\Phi_m$ и $-\Phi_m$ — наибольшие значения потока (см. рис. 62а), то полное изменение магнитного потока за полупериод $T/2$ выразится разностью

$$+\Phi_m - (-\Phi_m) = 2\Phi_m.$$

Следовательно, средняя электродвижущая сила одного витка обмотки за тот же промежуток времени будет

$$e_{cp} = \frac{2\Phi_m}{T/2} = 4\frac{\Phi_m}{T}.$$

Так как $\frac{1}{T} = f$, то

$$e_{cp} = 4f\Phi_m.$$

Обозначим отношение действующего значения электродвижущей силы одного витка $e_д$ к среднему значению электродвижущей силы e_{cp} через $k_в$. Тогда

$$e_д = e_{cp} k_в = 4 k_в f \Phi_m.$$

Коэфициент $k_в$ называется коэфициентом формы кривой электродвижущей силы.

Действующие значения электродвижущих сил первичной и вторичной обмоток будут:

$$E_1 = 4k_в f w_1 \Phi_m \cdot 10^{-8} \text{ вольт};$$

$$E_2 = 4k_в f w_2 \Phi_m \cdot 10^{-8} \text{ вольт}.$$

Для синусоиды коэфициент формы $k_в = 1{,}11$. Если подставить это значение в последние формулы, то получим ранее выведенные выражения для E_1 и E_2.

Для тупых кривых, подобных трапеции, коэфициент формы $k_в < 1{,}11$, а для острых кривых, подобных треугольнику, $k_в > 1{,}11$.

Изучение работы трансформаторов производится обычно помощью векторных диаграмм. Если отказаться пока от рассмотрения побочных явлений, то упрощенная векторная диаграмма для случая, когда вторичная обмотка разомкнута, представится рис. 66а, на котором Oa — вектор потока Φ; Oc и Od — векторы электродвижущих сил первичной и вторичной обмоток E_1 и E_2, отложенные в сторону отставания на 90° от вектора потока; Oe — вектор приложенного к первичной обмотке напряжения V_1, уравновешивающего первичную электродвижущую силу.

С вектором магнитного потока совпадает вектор Ob той магнитодвижущей силы, которая этот поток создает и которая равна $0{,}4\pi I_a w_1$, если через I_a обозначить ток в первичной обмотке. Тот же вектор Ob в другом масштабе может изображать намагничивающие ампервитки первичной обмотки $I_a w_1$ или просто намагничивающий ток I_a.

§ 21. Ток холостой работы трансформатора.

При разомкнутой вторичной обмотке электродвижущая сила, индуктирующаяся в первичной обмотке, почти равна по величине и прямо противоположна по направлению приложенному напряжению, так как она его уравновешивает. Ток в первичной обмотке создается только небольшою разностью между приложенным к ней напряжением V_1 и индуктируемой в ней же электродвижущей

силою E_1. Этот ток, так называемый ток холостой работы, у обычных трансформаторов относительно весьма мал (он равен 5—10% нормального тока). Для создания магнитного потока в замкнутом железном сердечнике с небольшим магнитным сопротивлением, при большом числе витков первичной обмотки, требуется незначительный намагничивающий ток.

При синусоидальном напряжении, приложенном к первичной обмотке, магнитный поток должен быть синусоидальным, так как только при синусоидальном потоке индуктируемая им электродвижущая сила может уравновесить приложенное синусоидальное напряжение. Казалось бы, что и намагничивающий ток должен быть синусоидальным. В действительности, однако, намагничивающий ток трансформатора далеко не синусоидален. Причинами этого обстоятельства являются: 1) способность железа насыщаться, благодаря чему магнитный поток меняется не пропорционально намагничивающему току, 2) задерживающая или коорцетивная сила железа, проявляющая себя при переменном намагничении (гистерезис).

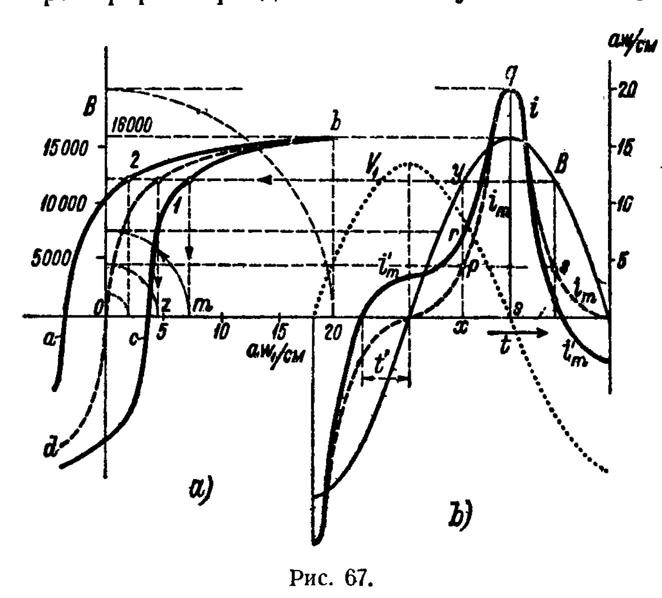


Рис. 67.

На рис. 67a изображен известный „шлейф гистерезиса", т. е. кривая *abcd*, иллюстрирующая действительное изменение магнитного потока или индукции в железном сердечнике при изменении намагничивающей силы. По оси ординат на рис. 67a отложена индукция в железе сердечника B, а по оси абсцисс — число ампервитков, приходящихся на один сантиметр пути потока, т. е. $aw_1/см$. В другом масштабе мы могли бы отложить по оси ординат магнитный поток в сердечнике Φ, ибо $\Phi = BQ$, где B — индукция, а Q — поперечное сечение сердечника; по оси же абсцисс мы могли бы отложить намагничивающий ток I_m, ибо $\frac{I_m w_1}{l} = aw_1/см$, где w_1 — число витков первичной обмотки, а l — средняя длина пути магнитного потока.

На рис. 67b синусоида V_1 иллюстрирует изменение во времени приложенного к первичной обмотке напряжения, а кривая B иллюстрирует изменение во времени магнитной индукции (или магнитного потока) в сердечнике трансформатора. Масштаб для ординат кривой B тот же, что и для ординат шлейфа гистерезиса *abcd*.

Предположим сначала, что гистерезис и токи Фуко в железе отсутствуют, а изменение индукции при изменении ампервитков намагничения происходит по кривой намагничения *Obd*. В таком случае для получения индукции, меняющейся во времени по синусоиде B, необходим намагничивающий ток, меняющийся по кривой (пунтирной) i_m. Эту кривую легко построить по кривым B и *Obd*. Например, для какого-либо момента времени x индукции xy соответствует по кривой *Ob* намагничивающие ампервитки Oz, которые в том же масштабе отложены по ординате xy в виде отрезка $xp = \overline{Oz}$ (последовательный ход нахождения точек кривой i_m указан на рис. 67 стрелками). Из рис. 67 видно, что, благодаря свойству железа насыщаться, кривая намагничивающего тока, необходимого для создания синусоидальной индукции, в значительной степени отличается от синусоиды. Ее амплитуда sq совпадает, однако, с амплитудой кривой индукции B; точно так же совпадают и нулевые значения обеих кривых.

Под влиянием магнитного гистерезиса кривая намагничивающего тока несколько искажается. Если принять, что процесс переменного намагничения происходит по кривой *abcd*, то синусоидальное изменение индукции будет иметь место только при намагничивающем токе, меняющемся во времени по кривой i'_m, (рис. 67b). Нахождение ординат этой кривой не отличается от нахождения ординат кривой i_m (см. на рис. 67 нахождение ординаты $\overline{xr} = \overline{Om}$ для индукции xy по ветви *1* кривой *abcd*).

Из рисунка видно, что под влиянием гистерезиса кривая намагничивающего тока i'_m стала несимметричной. Хотя ее амплитуда совпадает с амплитудой кривой индукции, но нулевые значения смещены относительно соответствующих нулевых значений кривой индукции B в сторону опережения на некоторый промежуток времени t'. Так как мягкое трансформаторное железо обладает весьма небольшою задерживающею силою, то опережение кривой намагничения относительно кривой индукции незначительно. Тем не менее это опережение говорит нам, что в данном случае (т. е. при наличии гистерезиса) намагчичивающий ток уже имеет активную составляющую, которая несет с собой из сети энергию для покрытия расхода энергии в железе на работу гистерезиса. Это видно из того, что кривая i'_m отстает по фазе от кривой напряжения V_1 на угол, меньший 90° (см. рис. 67). Реактивная составляющая намагничивающего тока, совпадающая по фазе с кривой индукции, является собственно намагничивающей. При переменном намагничении железа в нем наблюдается еще чисто электрическое явление: в массе железа индуктируются вторичные токи Фуко (см. далее), которые имеют следствием потери энергии в этой массе. Эту энергию должен доставить первичной обмотке тот же намагничивающий ток своею дополнительною активною составляющей. Если на рис. 68a нанести кривую активного тока i_ϕ, покрывающего потери, причиняемые токами Фуко в железе (кривая i_ϕ совпадает по фазе с кривой напряжения V_1), а затем ординаты этой кривой сложить с ординатами кривой намагничивающего тока i_m', то мы получим кривую действительного намагничивающего тока i_m'' (форма этой кривой под-

тверждается экспериментально). Из рис. 68а мы видим, что опережение кривой намагничивающего тока относительно кривой индукции под влиянием токов Фуко увеличилось и стало равным t''. Иными словами, отставание намагничивающего тока от напряжения V_1 уменьшилось.

Кривая намагничивающего тока трансформатора i_m'', как показывает рис. 68а, несинусоидальна. Но ее, как кривую периодическую, можно разложить на ряд синусоидальных кривых, а именно: на основную синусоиду (или основную гармонику), имеющую ту же периодичность, что и исходная кривая i_m'', и на ряд синусоид или гармоник высшего порядка, т. е. имеющих высшие периодичности, нежели у действительной кривой. На рис. 68b приведены примерные составляющие кривой намагничивающего тока i_m'': основная синусоида тока I_1 и кривая I_a, содержащая все остальные синусоиды высшего порядка. В виду специфической формы шлейфа гистерезиса, определяющей в основном форму кривой намагничивающего тока i_m'', в этой кривой особенно ярко выражена третья гармоника и несколько слабее пятая гармоника. Степень проявления третьей и пятой гармоник зависит от значения наибольшей индукции, допускаемой в сердечнике трансформатора, а также от сорта железа. В таблице 7 приведены примерные значения амплитуды высших гармоник, выраженные в процентах от амплитуды основной гармоники, при разных значениях наибольшей индукции (железо — высоколегированное).

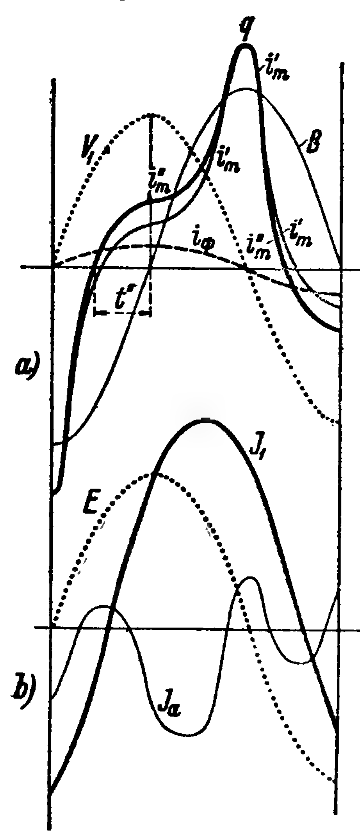


Рис. 68.

ТАБЛИЦА 7.

B_{max} гауссы	Основная гармоника %	Третья гармоника %	Пятая гармоника %	Седьмая гармоника %	Девятая гармоника %
10 000	100	4,5	1,4	0,3	0,2
12 000	100	10,9	3,6	0,5	(,4
14 000	100	31,2	15,7	6,7	0,37
16 000	100	54,9	27,2	9,9	0,26
18 000	100	60,5	25,3	48,8	0,16

Из таблицы 7 видно, что чем больше значение наибольшей индукции в сердечнике, тем эффективнее проявление третьей и пятой

гармоник. Учитывая значительное возрастание третьей гармоники свыше индукции $B_{max} = 14\,000$, в настоящее время стараются удержать значение наибольшей индукции в сердечниках трансформаторов в пределах 11 000—14 000.

Из изложенного следует, что

> **для того, чтобы магнитный поток трансформатора с железом был синусоидальным, намагничивающий ток его должен быть несинусоидальным и содержать главным образом третью и пятую гармоники.**

§ 22. Эквивалентный ток холостой работы трансформатора.

Несинусоидальный ток непригоден для изображения его на векторных диаграммах, ибо в них векторами изображаются величины, меняющиеся во времени по закону синуса.

В целях облегчения изучения главнейших явлений в трансформаторе несинусоидальный намагничивающий ток заменяется синусоидальным эквивалентным током, т. е. таким, который доставлял бы трансформатору ту же мощность и создавал бы такой же магнитный поток, что и действительный ток. Найдем этот эквивалентный ток.

Мощность, доставляемая трансформатору, работающему вхолостую, расходуется в нем самом на покрытие потерь в меди первичной обмотки и потерь в железе от гистерезиса и токов Фуко. Первые потери происходят от омического сопротивления первичной обмотки; они ничтожно малы, так как ток холостой работы трансформатора незначителен. Потери на гистерезис происходят от работы, которая затрачивается на преодоление молекулярного трения при перемагничении железа. Эти потери за один период перемагничения железа пропорциональны площади шлейфа гистерезиса (на рис. 67—площади *abcd*); они зависят, следовательно, от величины магнитной индукции в железе трансформатора. Штейнмец экспериментально установил, что потери на гистерезис железа возрастают пропорционально индукции в степени 1,6. В настоящее время при расчетах часто принимают, что потери на гистерезис меняются пропорционально индукции во второй степени.

Следуя Арнольду, потери на гистерезис можно определить по следующей формуле, являющейся развитием известной формулы Штейнмеца:

$$P_г = \sigma_г \left(\frac{f}{100}\right) \cdot \left(\frac{B_m}{1000}\right)^{1,6} v_ж \text{ ватт},$$

где $\sigma_г$ — постоянная гистерезиса, которую для хороших сортов железа можно принять равной единице, а для железа, содержащего кремний, меньше единицы, а именно 0,5 — 0,63; f — частота переменного тока в герцах; B_m — наибольшее значение индукции в железе в гауссах и $v_ж$ — объем железа в кубических дециметрах.

Потери от токов Фуко происходят от паразитных токов, которые индуктируются переменным магнитным потоком в листах железа трансформатора. Эти токи проходят в поперечном сечении каждого листа по примерным путям, указанным на рис. 69, совпадая по направлению с вторичною электродвижущею силою E_2 во вторичной обмотке; они порождаются электродвижущими силами, индуктируемыми в контурах, подобных указанным пунктиром на рис. 69.

Потери от токов Фуко являются джоулевыми потерями в массе железа; они пропорциональны этим токам во второй степени. Но так как порождающие токи Фуко электродвижущие силы пропорциональны потокам, пронизывающим контуры, в которых они образуются, т. е. индукции в железе, а также пропорциональны числу периодов изменения потока, то в общем потери от токов Фуко пропорциональны индукции в железе и числу периодов во второй степени.

С достаточной для практики точностью эти потери могут быть определены по формуле Арнольда:

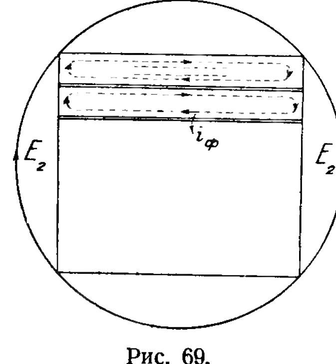


Рис. 69.

$$P_ф = \sigma_ф \left(d \frac{f}{100} \cdot \frac{B_m}{1000}\right)^2 v_ж \text{ ватт},$$

где $\sigma_ф$ — постоянная, которая для обычных сортов железа находится в пределах от 1,3 до 1,6, для железа же с кремнием — в пределах от 0,4 до 0,5; d — толщина листов железа в миллиметрах.

При плохой сборке сердечника, когда отдельные листы железа соединяются между собою электрически железными заусеницами и изоляция между ними в виде лака или тонкого слоя бумаги как бы аннулируется, потери от токов Фуко могут быть значительно больше вычисленных по приведенной формуле.

Видмар дает следующую формулу для общих потерь в железе от гистерезиса и токов Фуко:

$$P_г + P_ф = K_e \left(\frac{B_m}{10\,000}\right)^2 \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} G_e \text{ ватт},$$

где G_e — вес железа в килограммах; K_e — постоянная потерь, которая для высоколегированного трансформаторного железа равна приблизительно 1,3 W/*кг*, а для обычного легированного железа составляет 2,3 W/*кг*.

При быстрых подсчетах потерь в железе можно воспользоваться кривыми, изображенными на рис. 70, которые дают потери в 1 *кг* пластинчатого железа толщиною 0,35 и 0,5 *мм* при разных индукциях и при частоте 50 Hz. Кривые построены по данным таблицы 2.

Зная потери от гистерезиса и от токов Фуко в железе трансформатора, легко определить ту активную составляющую эквивалентного синусоидального тока, которая идет на покрытие этих

потерь. Обозначив ее через I_{0r}, имеем:

$$I_{0r} = \frac{P_г + P_ф}{V_1},$$

где V_1 — первичное напряжение.

Значение потерь в железе трансформаторов по Общесоюзному стандарту (ОСТ — 4815) см. в конце книги „Приложения“.

Найдем теперь реактивную составляющую эквивалентного тока.

Реактивная составляющая эквивалентного тока I_{0x}, идущая на создание собственно магнитного потока, должна содержать реактивную составляющую I_{01} первой гармоники тока I_1 и все токи высших гармоник I_a, ибо эти последние токи, имея иную периодичность, чем первичное напряжение V_1, по отношению к нему являются реактивными.

Рис. 70.

Таким образом, реактивная составляющая эквивалентного синусоидального тока будет

$$I_{0x} = \sqrt{I_{x1}^2 + I_a^2}.$$

Реактивную составляющую тока I_{0x}, или собственно намагничивающий ток, т. е. ток, создающий собственно магнитный поток, можно определить, зная величину магнитного потока и размеры магнитной цепи.

Рис. 71.

Пусть, например, Φ_m — наибольшее значение магнитного потока, Q_c и $Q_я$ — поперечные сечения стержня и ярма сердечника в квадратных сантиметрах, l_c и $l_я$ — средние длины путей магнитного потока в стержне и в ярме в сантиметрах (рис. 71). Тогда индукция в обоих стержнях стержневого трансформатора и в среднем стержне броневого трансформатора будет равна

$$B_c = \frac{\Phi_m}{Q_c};$$

индукция в ярме стержневого трансформатора

$$B_я = \frac{\Phi_m}{Q_я};$$

индукция в ярме и боковых стержнях броневого трансформатора

$$B_я' = \frac{\Phi_m}{2Q_я}$$

(в предположении, что сечения ярма и боковых стержней одинаковы).

Зная кривую намагничения для данного сорта железа (рис. 72), находим ампервитки на сантиметр при определенных значениях индукции: aw_c при B_c, $aw_я$ при $B_я$, $aw_я'$ при $B_я'$. (Нижний масштаб для ампервитков соответствует верхней кривой.) Затем находим ампервитки для всего пути магнитного потока по формулам:

при стержневом трансформаторе (рис. 71а)

$$AW_m = 2l_c aw_c + 2l_я aw_я + 0{,}8 \cdot 4\delta \cdot B_c;$$

при броневом трансформаторе (рис. 71b)

$$AW_m = l_c aw_c + (2l_я + l_c)\, aw_я' + 0{,}8 \cdot 2\delta \cdot B_c + 0{,}8 \cdot 2\delta \cdot B_я'.$$

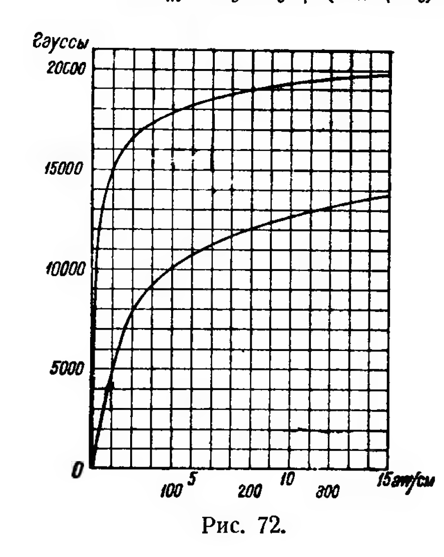


Рис. 72.

В этих формулах под δ подразумевается длина воздушной щели, которая получается в месте стыка между ярмом и сердечником; приближенно можно считать $\delta = 0{,}005$ *см*; у трансформаторов большой мощности $\delta = 0{,}05$—$0{,}15$ *см*.

Если мы поделим найденные намагничивающие ампервитки на число витков первичной обмотки w_1, то получим наибольшее значение намагничивающего тока $I_{0x\,max}$. Действующее значение намагничивающего тока

$$I_{0x} = \frac{I_{0x\,max}}{\sqrt{2}}.$$

Следует заметить, что соотношение между наибольшим и действующим значениями намагничивающего тока, равное $\sqrt{2} = 1{,}41$, предполагает синусоидальное изменение этого тока. В действительности намагничивающий ток, как показывает кривая рис. 68а, меняется по заостренной сверху кривой. Вследствие этого отношение между наибольшим и действующим значениями действительного намагничивающего тока больше $\sqrt{2}$. При индукциях 11 000—14 000 это отношение находится в пределах 1,6—2,3.

Имея активную и реактивную составляющие эквивалентного синусоидального тока, легко найти и самый ток, используя для этой цели диаграмму рис. 73. На этой диаграмме вектор $\overline{Oa}$ изображает магнитный поток Φ_m; вектор $\overline{Oe}$ изображает приложенное к первичной обмотке напряжение V_1, опережающее поток на 90°; вектор $\overline{Ob}$ изображает реактивную составляющую эквивалентного тока I_{0x}, совпадающего по фазе с магнитным потоком; вектор $\overline{Od}$

изображает активную составляющую эквивалентного тока I_{0r}, совпадающего по фазе с напряжением V_1. Равнодействующий вектор Oc дает полный эквивалентный ток I_0. По величине он определится выражением

$$I_0 = \sqrt{I_{0x}^2 + I_{0r}^2}.$$

По фазе эквивалентный ток опережает магнитный поток на угол α.

Пример. Определить ток холостой работы трансформатора с первичным напряжением $V_1 = 120$ V, у которого число витков первичной обмотки $w_1 = 45$, поперечное сечение железа сердечника (стержней и ярма) $Q_c = 100$ *см*², средняя длина магнитного потока $l_c = 110$ *см*, частота $f = 50$ Hz.

Решение. Пользуясь выражением для электродвижущей силы

$$E_1 \doteq 4{,}44 f w_1 \Phi_m \cdot 10^{-8},$$

определяем магнитный поток

$$\Phi_m = \frac{120}{4{,}44 \cdot 50 \cdot 45 \cdot 10^{-8}} = 1{,}2 \cdot 10^6.$$

Индукция в сердечнике

$$B_m = \frac{\Phi_m}{Q_c} = \frac{1{,}2 \cdot 10^6}{100} = 12\,000.$$

По кривой намагничения, рис. 72, при индукции $B = 12\,000$ необходимые ампервитки на сантиметр равны $aw = 8$. Следовательно, полное число намагничивающих ампервитков будет

$$AW = aw \cdot l_c = 8 \cdot 110 = 880.$$

Наибольшее значение намагничивающего тока

$$I_{0x\,max} = \frac{880}{45} = 18{,}6 \text{ A}.$$

Рис. 73.

Действующее значение намагничивающего тока

$$I_{0x} = \frac{18{,}6}{\sqrt{2}} = 13{,}6 \text{ A}.$$

Объем железа сердечника $v_ж = 110 \cdot 100$ *см*³. Считая удельный вес железа равным 7,5, получаем вес сердечника равным 82,5 *кг*. По кривым рис. 70 находим потери на 1 *кг* при индукции $B = 12\,000$ равными 2 W. Следовательно, общие потери будут равны $2 \cdot 82{,}5 = 165$ W. Активная составляющая тока холостой работы

$$I_{0r} = \frac{165}{120} = 1{,}4 \text{ A}.$$

Ток холостой работы

$$I_0 = \sqrt{1{,}4^2 + 13{,}6^2} = 13{,}7 \text{ A}.$$

Определенный таким образом намагничивающий ток I_0 практически весьма мало отличается от того тока, который в действительности идет в первичной обмотке трансформатора при холостой его работе. Поэтому ток I_0 и называют током холостой работы трансформатора.

Так как трансформаторам часто приходится работать вхолостую, то при изготовлении их стараются по возможности снизить мощность и ток холостой работы. Первое, как уже было указано, достигается применением железа с меньшими потерями в нем, лучшей изоляцией листов, а второе достигается допущением меньшей индукции в железе (в пределах 10 000 — 14 000) и лучшей сборкой сердечников.

В таблице 8 даны в процентах от нормального тока наибольшие значения тока холостой работы, установленные, как предельные, Французским электротехническим комитетом для трансформаторов разных типов.

ТАБЛИЦА 8.

Токи холостой работы в процентах от нормального тока.

Типы трансформаторов	Частота 25 Hz			Частота 50 Hz		
	Напряжение					
	5 000	15 000	30 000	5 000	15 000	30 000
Трансформаторы однофазные 10 kVA или трехфазные 15 kVA:						
1) масляные с пониженными потерями (осветнтельные)	10,5	3,6	16	8,5	11	13
2) масляные с нормальными потерями (силовые)	20	23,5	29	16,5	19,5	23
3) сухие	15	19	—	11,8	15,4	—
Трехфазные трансформаторы свыше 250 kVA, масляные с естественным охлаждеиием:						
1) с пониженными потерями	4,4	4,9	5,1	3,5	4,0	4,3
2) с нормальными потерями	9,5	10,1	11,5	7,6	8,2	9,3

Как видно из таблицы 8, процентное значение тока холостой работы уменьшается с увеличением мощности трансформатора. У осветительных трансформаторов, работающих вхолостую и рассчитываемых обычно с пониженными потерями, т. е. с небольшой индукцией в железе, процентное значение тока холостой работы меньше, чем у силовых трансформаторов, редко работающих вхолостую. Наконец, у трансформаторов высокого напряжения, у которых длина сердечника получается несколько большей, чем у трансформаторов низкого напряжения (в целях рациональной конструкции обмотки), процентное значение тока холостой работы больше, чем у трансформаторов низкого напряжения.

§ 23. Вопросы для самопроверки.

1. Каково выражение для электродвижущей силы трансформатора?
2. Как влияет насыщение железа на форму кривой намагничивающего тока?
3. Как влияет гистерезис на форму кривой намагничивающего тока?
4. Какие гармоники содержит кривая намагничивающего тока?
5. Как определяется эквивалентный ток холостой работы трансформатора?
6. Магнитная цепь трансформатора 1000 kVA имеет среднюю длину 240 *см* и среднее сечение сердечника 1800 *см*^{2}. Этот трансформатор рассчитан для работы при напряжении 66 000 V и при частоте 50 Hz. Сколько витков должна иметь обмотка, если наибольшая индукция равна 10 800 гауссов? Каковы ток и коэфициент мощности ($\cos \varphi_0$) холостой работы трансформатора?

ГЛАВА ШЕСТАЯ.

ЯВЛЕНИЯ В ТРАНСФОРМАТОРЕ ПРИ НАГРУЗКЕ.

§ 24. Магнитодвижущие силы обмоток трансформатора при нагрузке.

При холостой работе трансформатора в его магнитной цепи действует магнитодвижущая сила тока одной первичной обмотки.

Как только мы нагрузим трансформатор, в магнитной цепи его будет действовать магнитодвижущая сила вторичной обмотки, равная $0{,}4\pi I_2 \sqrt{2} w_2$, где I_2 — ток во вторичной обмотке, а w_2 — число витков этой обмотки. Согласно закону Ленца магнитодвижущая сила вторичной обмотки действует против магнитодвижущей силы первичной обмотки. Вследствие этого магнитный поток трансформатора несколько уменьшится. Но магнитный поток не может уменьшиться в значительной степени: его поддержит приложенное к первичной обмотке постоянное напряжение. В самом деле, с уменьшением магнитного потока уменьшится несколько первичная электродвижущая сила, уравновешивающая приложенное к первичной обмотке напряжение. Вследствие этого в первичную обмотку пойдет бо́льший ток и настолько бо́льший, что магнитодвижущая сила первичной обмотки скомпенсирует размагничивающее действие вторичной магнитодвижущей силы и одновременно создаст магнитный поток, почти равный магнитному потоку при холостой работе.

Изложенное взаимодействие магнитодвижущих сил обмоток трансформатора весьма наглядно иллюстрируется векторной диаграммой, изображенной на рис. 74.

На рис. 74 дано сложение не магнитодвижущих сил первичной и вторичной обмоток, а ампервитков их, которым они пропорциональны, т. е. векторами изображены произведения $I_1 w_1$ и $I_2 w_2$, где I_1 и I_2 — токи, а w_1 и w_2 — числа витков первичной и вторичной

обмоток. Диаграмма начерчена в предположении, что вторичный ток I_2 отстает от вторичной электродвижущей силы E_2 на угол ψ_2.

На диаграмме рис. 74 вектор $\overline{Oa}$ изображает магнитный поток Φ_a; вектор $\overline{Oc_2}$ изображает вторичную электродвижущую силу E_2, смещенную относительно потока Φ на 90° в сторону отставания; вектор $\overline{Od}$ изображает ампервитки вторичной обмотки I_2w_2, совпадающие по фазе с вторичным током I_2; вектор $\overline{Oe}$ изображает ампервитки первичной обмотки I_1w_1, совпадающие по фазе с первичным током I_1.

Как видно из диаграммы, ампервитки первичной обмотки можно рассматривать как состоящие из двух составляющих. Одна составляющая, изображенная на диаграмме вектором $\overline{Of}$, равна и противоположна ампервиткам вторичной обмотки. Эта составляющая компенсирует размагничивающее действие вторичной обмотки. Вторая составляющая, изображенная на диаграмме вектором $\overline{Ob}$, совпадает по фазе с магнитным потоком. Эта составляющая создает магнитный поток при нагрузке. По величине последняя составляющая почти равна ампервиткам первичной обмотки при холостой работе, т. е. $\overline{I_0w_1}$.

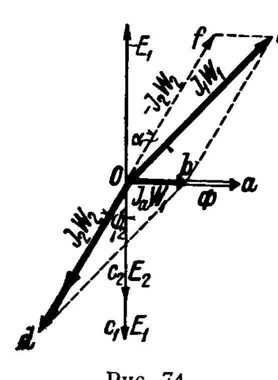


Рис. 74.

Таким образом можно сказать, что и при нагрузке трансформатора магнитный поток создается собственно первичною обмоткою. Но так как первичная обмотка создает фактически ампервитки I_1w_1, а не составляющие их, то можно сказать и так, что магнитный поток создается равнодействующей из ампервитков первичной и вторичной обмоток, которая получается геометрическим сложением их. На рис. 74 эта равнодействующая магнитодвижущая сила изображена вектором Ob.

Если пренебречь составляющей Ob, как весьма небольшой в сравнении с составляющей Of, то можно сказать, что $\overline{Oe}=\overline{Od}$, или $I_1w_1=I_2w_2$; но $w_1:w_2=E_1:E_2$. Следовательно,

$$E_1I_1=E_2I_2,$$

т. е.

> **мощность первичной обмотки, выраженная в вольт-амперах, равна мощности вторичной обмотки, также выраженной в вольт-амперах.**

Это последнее равенство непосредственно следует из закона сохранения энергии. Если пренебречь потерями в обмотках и железе, то можно сказать, что вся мощность, получаемая первичною обмоткою трансформатора от сети, передается вторичной обмотке его, причем передатчиком является магнитный поток.

§ 25. Поток рассеяния и вызываемое им реактивное сопротивление обмотки трансформатора, работающего вхолостую.

Разбирая принцип действия трансформатора, мы видели, что магнитная связь между первичною и вторичною обмотками несовершенна: не весь магнитный поток первичной обмотки сцепляется со всеми витками первичной и вторичной обмоток. Имеются силовые линии потока, которые сцепляются лишь с частью витков первичной обмотки и совершенно не сцепляются с витками вторичной обмотки. На рис. 75а изображены примерные пути прохождения силовых линий магнитного поля, создаваемого одною лишь первичною цилиндрической обмоткою. На этом рисунке буквою Ф обозначен главный магнитный поток, проходящий через сердечник трансформатора и сцепляющийся со всеми витками первичной и вторичной обмоток. Буквою же Φ_s обозначена часть силовых линий поля первичной катушки, которые совершенно не сцепляются с витками вторичной и потому являются силовыми линиями магнитной утечки или магнитного рассеяния. Но если силовые линии поля рассеяния совершенно не сцепляются с витками вторичной обмотки и потому в ней не индуктируют электродвижущей силы, то с витками первичной обмотки эти силовые линии сцепляются, хотя и в разной степени. Например, силовая линия *1* на рис. 75а сцепляется с небольшим числом витков первичной обмотки; силовая линия *2* сцепляется с бо́льшим числом витков; силовая линия *3* сцепляется с еще бо́льшим числом витков обмотки и т. д. Так как поле рассеяния есть поле переменное во времени, то оно индуктирует в витках обмотки электродвижущую силу, которую мы можем определить по общей, ранее выведенной формуле, а именно

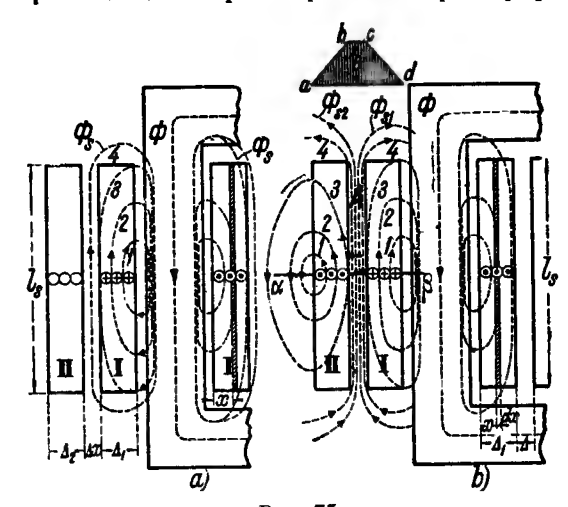


Рис. 75.

$$E_{s1}=\frac{2\pi}{\sqrt{2}}f\sum_1^n\Phi_x\cdot w_x\cdot 10^{-8}.$$

В этом выражении $\sum\limits_1^n\Phi_x w_x$ заменят произведение $\Phi_m w_1$, которое имелось в формуле для первичной электродвижущей силы и кото-

рое было равно числу потокосцеплений главного потока Φ_m со всеми витками w_1 обмотки. $\sum_1^n \Phi_x w_x$ есть сумма потокосвязей поля рассеяния с витками первичной обмотки. Эту сумму можно представить в следующем виде:

$$\sum_1^n \Phi_x w_x = \Phi' w' + \Phi'' w'' + \Phi''' w''' + \ldots,$$

где Φ' — число силовых линий, сцепляющихся с w' витками, Φ'' — число силовых линий сцепляющихся с w'' витками, и т. д.

Если через Φ_{s1} обозначить фиктивный поток рассеяния, который, предположим, сцепляется со всеми витками первичной обмотки, индуктируя ту же электродвижущую силу E_s, и для которого существует равенство

$$\Phi_{s1} \cdot w_1 = \sum_1^n \Phi_x w_x,$$

то мы можем написать

$$E_{s1} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w_1 \Phi_s \cdot 10^{-8}.$$

Электродвижущая сила E_{s1} называется электродвижущей силой поля рассеяния первичной обмотки.

Обозначим через L_{s1} число потокосцеплений поля рассеяния при токе в обмотке в 1 А, т. е. положим

$$L_{s1} = \frac{\sum_1^n \Phi_x w_x}{I_0 \sqrt{2}} \cdot 10^{-8}.$$

Тогда можно написать

$$E_{s1} = 2\pi f L_{s1} \cdot I_0.$$

Число потокосцеплений магнитного поля с обмоткою при токе в ней силою 1 А называют коэфициентом самоиндукции. В рассматриваемом случае L_{s1} — коэфициент самоиндукции первичной обмотки, отвечающий полю рассеяния ее.

Выражение для электродвижущей силы поля рассеяния первичной обмотки при токе холостой работы I_0 можно написать и так:

$$E_{s1} = I_0 x_1;$$

здесь $x_1 = 2\pi f L_{s1}$ есть реактивное сопротивление первичной обмотки, вызываемое ее полем рассеяния; произведение $I_0 x_1$ — падение напряжения в реактивном сопротивлении первичной обмотки (подобно тому как произведения $I_0 R_1$ — падение напряжения в активном сопротивлении первичной обмотки R_1).

Величина реактивного сопротивления обмотки зависит от типа обмотки и от расположения ее отдельных катушек на сердечнике трансформатора. Но для данного трансформатора и для данной частоты тока реактивное сопротивление считается величиной постоянной и не зависящей от тока.

Падение напряжения от реактивного сопротивления обмотки учитывается в векторной диаграмме вектором, смещенным относительно вектора тока этой обмотки на 90° в сторону запаздывания.

§ 26. Потоки рассеяния и вызываемые ими реактивные сопротивления обмоток трансформатора, работающего под нагрузкой.

При работе трансформатора под нагрузкою токи имеются как в первичной, так и во вторичной обмотках, причем эти токи имеют почти взаимно противоположные направления. В этом случае обе обмотки создают вокруг себя поля рассеяния, сцепляющиеся только со своими обмотками.

На рис. 75b показана примерная картина путей прохождения силовых линий полей рассеяния при наличии токов в первичной и вторичной обмотках с цилиндрическими катушками. Предположено, что в первичной обмотке ток направлен от зрителя, тогда как во вторичной обмотке ток направлен к зрителю. Нетрудно видеть, что группы проводников первичной обмотки I и вторичной II образуют как бы соленоид со щелью *A* между ними. В этой щели проходят силовые линии полей рассеяния обеих обмоток, а потому индукция поля рассеяния в щели имеет наибольшее значение. В точках левее или правее щели *A* индукция будет иметь уже меньшее значение, так как силовые линии рассеяния, например *1* или *2*, создаются меньшим числом ампервитков. Примерное распределение индукции по линии αβ, перпендикулярной к оси катушек и проведенной в середине их, можно изобразить ломаною кривою *abcd*.

На рис. 76 изображено примерное распределение силовых линий полей рассеяния трансформатора с тремя цилиндрическими катушками, из которых крайние катушки (наружная и внутренняя) принадлежат вторичной обмотке, а внутренняя катушка принадлежит первичной обмотке. Предположив, что токи в первичных и вторичных катушках идут во взаимно противоположных направлениях, легко усмотреть, что ломаная кривая *abcdef* дает распределение индукции по ширине катушек и по ширине щелей между ними.

На рис. 77 представлена примерная картина распределения силовых линий поля рассеяния в трансформаторе с дисковыми обмотками, в предположении, что катушки первичной и вторичной обмоток чередуются друг с другом. Предположив, что токи в первичных катушках (заштрихованных в одну сторону) и во вторичных катушках (заштрихованных в другую сторону) имеют взаимно противоположные направления, легко видеть, что ломаная кривая *abcdef* изобразит распределение индукции поперек катушек (по линии параллельной оси сердечника) и поперек щелей между ними. Магнитные силовые линии полей рассеяния, как видно из рис. 76

и 77, проходят главным образом через воздух и потому на них не оказывает влияния задерживающая сила железа сердечника. Это значит, что магнитные поля рассеяния можно считать совпадающими по фазе с токами, их создавшими.

Магнитные поля рассеяния, будучи переменными во времени, индуктируют в обмотках электродвижущей силы

$$E_{s1} = 2\pi f L_{s1} I_1;$$
$$E_{s2} = 2\pi f L_{s2} I_2,$$

где L_{s1} и L_{s2} — коэфициенты самоиндукции первичной и вторичной обмоток, отвечающих их полям рассеяния; I_1 и I_2 — токи в обмотках.

Обозначив через x_1 и x_2 произведения $2\pi f L_{s1}$ и $2\pi f L_{s2}$ и назвав их реактивным сопротивлениями первичной и вторичной обмоток, получим:

$$E_{s1} = x_1 I_1;$$
$$E_{s2} = x_2 I_2.$$

Произведения $x_1 I_1$ и $x_2 I_2$ называются падениями напряжения от реактивных сопротивлений первичной и вторичной обмоток. В векторных диаграммах эти падения учитываются векторами, смещенными относительно соответствующих токов на 90° в сторону запаздывания.

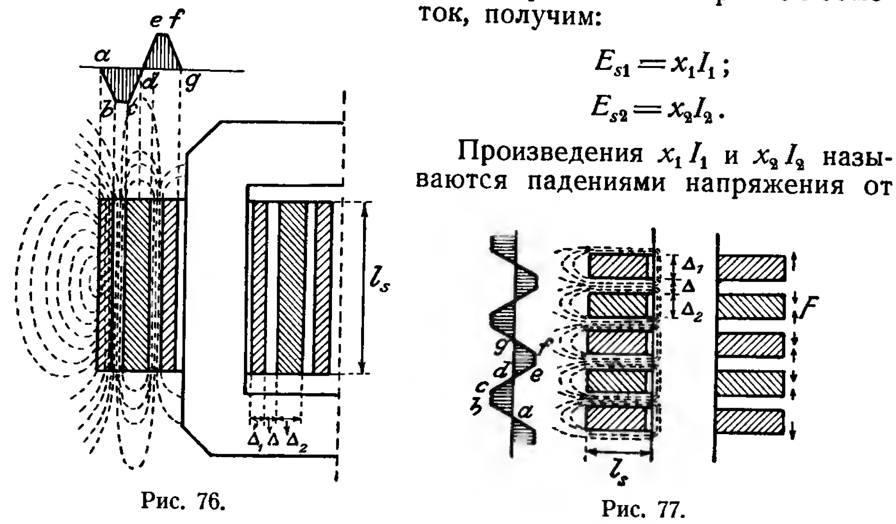


Рис. 76. Рис. 77.

Следует заметить, что пути прохождения магнитных линий потоков рассеяния не остаются постоянными, а меняются в течение каждого периода изменения тока. Чтобы уяснить себе по существу весьма сложное явление рассеяния магнитного потока в трансформаторах при нагрузке, рассмотрим сложение магнитодвижущих сил первичной и вторичной обмоток в разные моменты времени за один период изменения тока.

На рис. 78 изображены кривые изменения во времени магнитодвижущих сил: первичной обмотки — кривая *ABC* и вторичной обмотки — кривая *DEF*. Обе кривые взаимно сдвинуты на угол 180°—α, соответственно диаграмме рис. 74. Изменение равнодействующей магнитодвижущей силы, создающей потоки за целый период, представится при этом кривой *MNP*. Как видим, в 1-й момент времени

магнитодвижущие силы обеих обмоток равны и прямо противоположны; равнодействующая магнитодвижущая сила равна нулю, следовательно главный поток, сцепляющийся с обеими обмотками *I* и *II* (рис. 79), на котором изображена лишь одна половина броневого трансформатора, также равен нулю. Потоки же рассеяния образуются как первичною обмоткою, так и вторичною обмоткою, причем пути замыкания их будут соответствовать рис. 79. В период времени от 1-го момента до 2-го (см. рис. 78) магнитодвижущая сила первичной обмотки преобладает над магнитодвижущей силой вторичной; главный поток создается исключительно первичной обмоткой. Поток рассеяния замыкается только вокруг первичной обмотки, причем этот поток составляется из двух потоков: потока, создаваемого непосредственно первичным током (на рис. 80 потока Φ_{s1}), и потока, который замыкается вокруг первичной обмотки под действием вторичной магнитодвижущей силы, противоположной по действию первичной магнитодвижущей силе и как бы отталкивающей магнитные линии главного потока к первичной обмотке (на рис. 80 потока Φ_{s2}). Этот последний поток, хотя и замыкается вокруг первичной обмотки, обязан, однако, своим существованием вторичной обмотке. Потока рассеяния, замыкающегося вокруг вторичной обмотки, например, по линии *AB*, быть не может, так как в пространстве между катушками I и II не могут существовать одновременно потоки разных направлений. Итак, в период времени от 1-го до 2-го момента (рис. 78) потока рассеяния вокруг вторичной обмотки не имеется, поток же рассеяния вокруг первичной обмотки усиливается вследствие размагничивающего действия вторичной обмотки. Во 2-й момент имеется только одно первичное рассеяние, так как вторичный ток равен нулю. В период времени от 2-го до 3-го момента первичный и вторичный токи совпадают по направлению и потоки рассеяния замыкаются вокруг обеих обмоток, так как будто они составляют одну обмотку. В 3-й момент первичный ток равен нулю, и главный поток создается исключительно вторичным током. В этот момент поток рассеяния замыкается только вокруг вторичной обмотки, т. е. имеется одно только вторичное рассеяние. За промежуток времени от 3-го до 4-го момента вокруг первичной обмотки потока рассеяния не имеется,

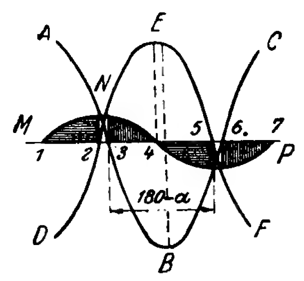


Рис. 78.

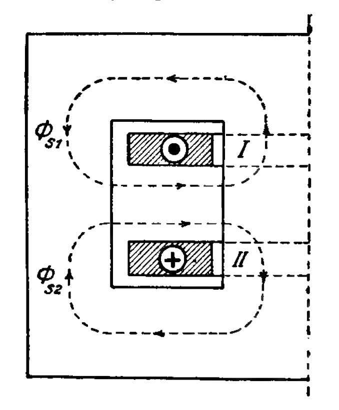


Рис. 79.

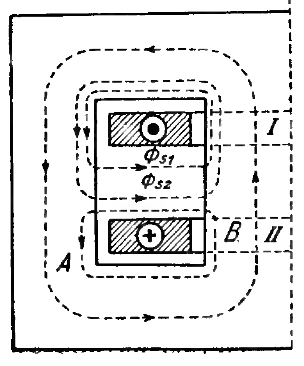


Рис. 80.

но вследствие размагничивающего действия этой обмотки на вторичную, поток рассеяния вокруг вторичной обмотки возрастает. За период времени от 4-го до 7-го момента явление в отношении вторичной обмотки протекает совершенно так же, как и за период времени от 1-го до 4-го момента в отношении первичной обмотки. Таким образом пути прохождения потоков рассеяния, а также распределение их вокруг обмоток за один период изменения тока непрерывно меняются. Во всяком случае, однако, собственно первичное, как и собственно вторичное рассеяние имеют ту же периодичность изменения, что и главный поток.

При рассмотрении явлений в трансформаторах влияние потоков рассеяния на напряжение учитывается двояко: 1) складывают потоки рассеяния с главным потоком и по равнодействующему потоку определяют электродвижущую силу, уравновешивающую напряжение и падение в активном сопротивлении; 2) определяют электродвижущие силы, которые индуктируются потоками рассеяния в обмотках, и складывают их затем с электродвижущими силами главного потока (Арнольд, Штейнмец). И в том и в другом случае имеют дело до известной степени с фиктивными величинами. Так, в первом случае потоки рассеяния первичной и вторичной обмоток, складываемые с главным потоком, представляют фиктивные величины, ибо в то время как главный поток пронизывает все витки обмотки в одинаковой степени, действительные потоки рассеяния пронизывают только части обмоток, и притом в разной степени. Потоки рассеяния — первичный Φ_{s1} и вторичный Φ_{s2} — рассматриваются как воображаемые потоки, которые, пронизывая все витки обмотки, как указано на рис. 79, дают такой же эффект, как и действительные потоки рассеяния. Во втором случае электродвижущие силы главного потока и потока рассеяния являются фиктивными электродвижущими силами, ибо в действительности имеется всего одна электродвижущая сила, которая индуктируется всеми линиями магнитного потока, пронизывающими обмотку. Таким образом электродвижущие силы главного потока и потока рассеяния представляют собою воображаемые составляющие действительной электродвижущей силы, введенные для облегчения рассмотрения явлений.

Что касается характера распределения потоков рассеяния вокруг обмоток, то он, как мы видели, меняется за один период изменения тока. Однако при определении коэфициентов самоиндукции потоков рассеяния предполагают, что картина распределения потоков рассеяния вокруг обмоток сохраняется неизменной и отвечает той, которая получалась бы в предположении, что токи в обмотках прямо противоположны.

В качестве примера определим коэфициенты самоиндукции от полей рассеяния цилиндрических катушек трансформатора. Разобьем силовые линии поля рассеяния каждой катушки на две группы: на группу линий, проходящих через щель A и сцепляющихся со всеми витками катушки (на рис. 75b силовые линии *4—4*) и на группу линий, проходящих через толщу катушки и сцепляющихся с частью витков этой катушки. Так как силовые линии поля рассеяния внутренней катушки I замыкаются через железный сердечник с весьма малым магнитным сопротивлением, то мы можем в качестве магнитного сопротивления для этих силовых линий считать только сопротивление пути в воздухе по высоте катушки l_s. То же сопротивление мы будем принимать и для силовых линий поля рассеяния наружной катушки II, ибо вне катушки силовые линии замыкаются в беспредельном пространстве воздуха и, следовательно, встречают незначительное сопротивление.

Обозначим ширину первичной и вторичной катушек через Δ_1 и Δ_2, ширину щели A между катушками через Δ, среднюю длину окружности первичной и вторичной катушек через u_1 и u_2, среднюю длину окружности щели A через u_m.

Предполагая, что одну половину щели занимает группа силовых линий первичной катушки и другую половину щели занимает группа силовых линий вторичной катушки, найдем сопротивление для каждой группы

$$R=\frac{l_s}{\frac{\Delta}{2}\cdot u_m}=\frac{2l_s}{\Delta\cdot u_m}.$$

Так как силовые линии щели создаются всеми ампервитками катушки, то магнитный поток катушки, например первичной, проходящий только через щель, будет

$$\Phi_1=\frac{0{,}4\pi\, i\, w_1}{R}=\frac{0{,}4\pi\cdot i\, w_1\cdot \Delta u_m}{2l_s},$$

а число потокосвязей будет

$$\Phi_1\cdot w_1=\frac{0{,}4\pi\cdot i w_1^2\cdot \Delta u_m}{2l_s}.$$

Для того чтобы определить число потокосвязей второй группы силовых линий, проходящих через толщу сечения катушки, поступим следующим образом. На расстоянии x от края катушки (см. правую сторону рис. 75b) выделим силовую трубку шириною dx и длиною по окружности катушки u_m. Ее сопротивление будет $\frac{l_s}{dx\cdot u_m}$, где u_m — средняя длина окружности катушки, принятой одинаковой для всех трубок шириною dx.

Выделенная нами трубка создается ампервитками $i\frac{w_1}{\Delta_1}x$, ибо число витков катушки от внутреннего края катушки до конца длины x будет $\frac{w_1}{\Delta_1}\cdot x$. Таким образом поток трубки равен

$$d\Phi_2=\frac{0{,}4\pi\, i\frac{w_1}{\Delta_1}x}{\frac{l_s}{dx\cdot u_m}}=\frac{0.4\pi\, i\, w_1\cdot x}{\Delta_1}\,\frac{dx\cdot u_m}{l_s}.$$

Число потокосвязей трубки равно

$$d\Phi_2 \frac{w_1}{\Delta_1} x = 0{,}4\pi \left(\frac{w_1}{\Delta_1}\right)^2 x^2 i \frac{dx \cdot u_m}{l_s}.$$

Общее число потокосвязей подобных трубок по ширине катушки Δ_1 будет

$$\int_0^{\Delta_1} 0{,}4\pi \left(\frac{w_1}{\Delta_1}\right)^2 x^2 i \frac{dx\, u_m}{l_s} = 0{,}4\pi \left(\frac{w_1}{\Delta_1}\right)^2 \frac{u_m}{l_s} i \int_0^{\Delta_1} x^2 dx =$$

$$= 0{,}4\pi \left(\frac{w_1}{\Delta_1}\right)^2 i \frac{u_m}{l_s} \frac{\Delta_1^3}{3}.$$

Итак, число потокосвязей обеих групп силовых линий поля рассеяния будет

$$\sum \Phi_x w_x = 0{,}4\pi i w_1^2 \frac{\Delta u_m}{2 l_s} + 0{,}4\pi w_1^2 i \frac{u_m}{l_s} \frac{\Delta_1}{3}.$$

Если это число потокосвязей отнести к силе тока в 1 А, то получим коэфициент самоиндукции от поля рассеяния первичной катушки:

$$L_{s1} = \frac{\Sigma \Phi_x w_x}{i} = 0{,}4\pi w_1^2 \frac{u_m}{l_s} \left(\frac{\Delta}{2} + \frac{\Delta_1}{3}\right) 10^{-8} \text{ генри}.$$

Совершенно так же можно получить выражение для коэфициента самоиндукции поля расссеяния вторичной катушки.

§ 27. Вопросы для самопроверки.

1. Как складываются магнитодвижущие силы или ампервитки первичной и вторичной обмоток трансформатора при нагрузке?
2. Что подразумевается под полями рассеяния первичной и вторичной обмоток трансформатора и как они влияют на работу последнего?
3. Что подразумевается под коэфициентом самоиндукции полей рассеяния обмоток трансформатора?
4. Что подразумевается под реактивным сопротивлением обмоток трансформатора?

ГЛАВА СЕДЬМАЯ.

ДИАГРАММЫ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩИХ СИЛ И ТОКОВ ТРАНСФОРМАТОРА.

§ 28. Диаграмма электродвижущих сил трансформатора, работающего вхолостую.

При работе трансформатора вхолостую приложенное к первичной обмотке напряжение V_1 уравновешивает: 1) электродвижущую силу самоиндукции E_1, индуктируемую главным магнитным потоком в первичной обмотке; 2) электродвижущую силу самоиндукции

поля рассеяния $E_{s1} = I_0 x_1$, индуктируемую магнитным полем рассеяния в первичной обмотке, и 3) падение напряжения в активном сопротивлении R_1 первичной обмотки, равное $I_0 R_1$.

Если через L_0 обозначить коэфициент самоиндукции от главного потока трансформатора (сцепляющегося целиком со всеми витками первичной обмотки) и через L_{s1} — коэфициент самоиндукции от поля рассеяния, то для какого-либо момента времени t, когда в обмотке проходит ток i_0, можно написать следующее равенство

$$\sqrt{2}\, V_1 \sin \omega t = L_0 \frac{di_0}{dt} + L_{s1} \frac{di_0}{dt} + i_0 R_1.$$

В этом равенстве левая часть представляет собою мгновенное значение приложенного к первичной обмотке напряжения, а правая часть представляет собою сумму мгновенных значений составляющих этого напряжения, компенсирующих электродвижущие силы самоиндукции главного потока и потока рассеяния, а также электродвижущую силу, равную падению. напряжения в активном сопротивлении обмотки.

В виду того, что коэфициент самоиндукции L_0 у современных трансформаторов, работающих с несколько насыщенным железом, не остается постоянным, равенство электродвижущих сил имеет другой вид.

Обозначив через Φ_t мгновенное значение главного потока, мы можем написать следующее равенство:

$$\sqrt{2}\, V_1 \sin \omega t = w_1 \cdot \frac{d\Phi_t}{dt} \cdot 10^{-8} + L_{s1} \frac{di_0}{dt} + i_0 R_1.$$

Диаграмма сложения этих электродвижущих сил изображена на рис. 81. Строится эта диаграмма следующим образом. Проводим вектор Oa главного магнитного потока трансформатора Ф. Под углом 90° к нему в сторону запаздывания проводим вектор Oc электродвижущей силы E_1 первичной обмотки. Если мы

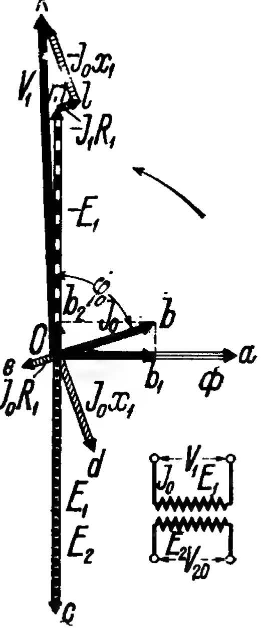
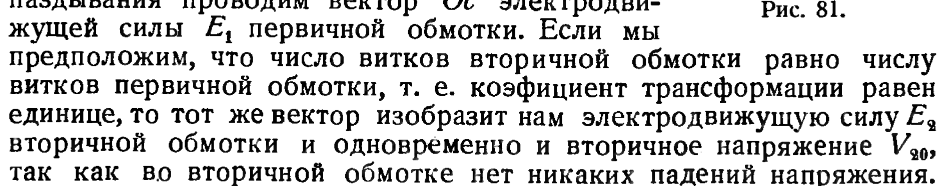


Рис. 81.



предположим, что число витков вторичной обмотки равно числу витков первичной обмотки, т. е. коэфициент трансформации равен единице, то тот же вектор изобразит нам электродвижущую силу E_2 вторичной обмотки и одновременно и вторичное напряжение V_{20}, так как во вторичной обмотке нет никаких падений напряжения.

По найденным, путем расчета (см. ранее), реактивной и активной составляющим тока холостой работы наносим вектор Ob тока холостой работы I_0. Имея в виду, что падения напряжения в реактивных сопротивлениях всегда отстают по фазе от тока на 90°, проводим вектор падения напряжения в реактивном сопротивлении первичной обмотки $Od = I_0 x_1$ перпендикулярно к вектору тока $\overline{Ob} = I_0$.

Рассматривая, далее, падение напряжения в активном сопротивлении первичной обмотки как электродвижущую силу, противодействующую прохождению тока, откладываем вектор падения напряжения в активном сопротивлении первичной обмотки $\overline{Oe}=I_0R_1$ в прямо противоположную сторону вектору тока $\overline{Ob}=I_0$.

Так как первичное напряжение V_1 уравновешивает электродвижущую силу E_1 и падения напряжения I_0R_1 и I_0x_1, то оно должно иметь составляющие, противоположно им направленные. На рис. 81 вектор $\overline{Om}=-E_1$ есть вектор составляющей первичного напряжения, уравновешивающей электродвижущую силу самоиндукции E_1, векторы $\overline{ml}=-I_0R_1$ и $\overline{lk}=-I_0x_1$ являются векторами составляющих напряжения, уравновешивающих падения напряжения в активном и реактивном сопротивлениях первичной обмотки. Замыкающий вектор $\overline{Ok}$ даст нам напряжение V_1, необходимое для того, чтобы через обмотку проходил ток I_0.

Из диаграммы видно, что ток холостой работы I_0 смещен относительно приложенного напряжения V_1 на угол φ_0 в сторону отставания. Так как ток I_0 почти совпадает по фазе с магнитным потоком Φ, то угол φ_0 при холостой работе довольно значителен. Это значит, что

при холостой работе коэфициент мощности ($\cos\varphi$) трансформатора невелик.

Обычно $\cos\varphi_0$ равен от 0,2 до 0,3.

Диаграмма сложения электродвижущих сил рис. 81 в точности отвечает схеме рис. 82, в которой активное сопротивление R_1 и реактивное сопротивление x_1 как бы изъяты из первичной обмотки и включены последовательно с нею. В самой же обмотке предположено существование только электродвижущей силы главного потока E_1, уравновешивающей напряжение, уменьшенное на величину падения напряжения в сопротивлениях R_1 и x_1. В этой же цепи идет ток холостой работы I_0, реактивная составляющая которого покрывает потери в железе трансформатора, а реактивная составляющая создает главный магнитный поток. Если $I_{0r}=\frac{P_г+P_ф}{V_1}$ — активная составляющая тока холостой работы, а I_{0x} — реактивная составляющая того же тока, то отношения $\frac{I_{0r}}{V_1}=g_0$ и $\frac{I_{0x}}{V_1}=b_0$ можно назвать: первое — активною проводимостью, а второе — реактивною проводимостью трансформатора при холостой работе, а $Y_0=\sqrt{g_0^2+b_0^2}$ можно назвать полною проводимостью трансформатора. Так как проводимость равна обратной величине сопротивления, то можно

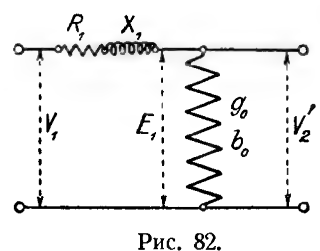


Рис. 82.

сказать, что $Z_0=\frac{1}{Y_0}$ — полное сопротивление трансформатора, на преодоление которого и идет составляющая приложенного напряжения, равная E_1. Таким образом действительный трансформатор, работающий вхолостую, в отношении сложения электродвижущих сил, может быть заменен простою схемою, изображенной на рис. 82. Эта схема, в которой g_0 и b_0 — активная и реактивная проводимости, называется эквивалентною схемою трансформатора, работающего вхолостую. В ней предполагается, что число витков первичной и вторичной обмоток равны друг другу, т. е. первичная и вторичная электродвижущие силы равны между собою.

§ 29. Приведение вторичной обмотки к первичной.

Электрическое равновесие в трансформаторе, работающем при нагрузке, в любой момент времени характеризуется равенствами: для первичной обмотки

$$\sqrt{2}\,V_1\sin\omega t=i_1R_1+w_1\frac{d\Phi_t}{dt}\cdot 10^{-8}+L_{s1}\frac{di_1}{dt};$$

для вторичной цепи:

$$0=\sqrt{2}\cdot V_2\cdot\sin\omega t+i_2R_2+w_2\frac{d\Phi_t}{dt}\cdot 10^{-8}+L_{s2}\cdot\frac{di_2}{dt}.$$

В этих равенствах Φ_t — мгновенное значение главного магнитного потока, сцепляющегося со всеми витками первичной и вторичной обмоток и создаваемого суммарным действием магнитодвижущих сил этих обмоток; L_{s1} и L_{s2} — коэфициенты самоиндукции от полей рассеяния первичной и вторичной обмоток, R_1 и R_2 — активные сопротивления первичной и вторичной обмоток.

В левой части первого равенства имеется мгновенное значение приложенного первичного напряжения; в правой же части того же равенства имеются мгновенные значения электродвижущих сил первичной обмотки, уравновешивающих приложенное напряжение, а именно: i_1R_1 — электродвижущая сила, заменяющая падение напряжения в активном сопротивлении первичной обмотки; $w_1\frac{d\Phi_t}{dt}\cdot 10^{-8}$ — электродвижущая сила, индуктируемая главным потоком; $L_{s1}\frac{di_1}{dt}$ — электродвижущая сила, индуктируемая потоком рассеяния первичной обмотки.

Левая часть второго равенства равна нулю, так как все электродвижущие силы вторичной обмотки вместе с напряжением на зажимах внешней цепи взаимно уравновешиваются. В правой же части второго равенства содержатся: мгновенное напряжение на зажимах вторичной обмотки $\sqrt{2}\,V_2\sin\omega t$, уравновешивающее все падения во внешней цепи; электродвижущая сила, заменяющая падение во вторичной обмотке i_2R_2; мгновенное значение электро-

движущей силы вторичной обмотки от главного потока $w_2 \frac{d\Phi_t}{dt} \cdot 10^{-8}$ и электродвижущая сила от поля вторичной обмотки $L_{s2} \frac{di_2}{dt}$.

Сложение электродвижущих сил и токов трансформатора при нагрузке удобнее производить графически, изображая их векторами.

Для того чтобы иметь возможность складывать электродвижущие силы и токи первичной и вторичной обмоток, имеющих разные числа витков, необходимо привести все величины, характеризующие вторичную обмотку, к первичной обмотке, короче — привести вторичную обмотку к первичной (или наоборот).

Это значит, что действительную вторичную обмотку следует заменить некоторою фиктивною обмоткою, имеющей такое же число витков, что и первичная, и такие сопротивления (активное и реактивное), при которых процентные падения напряжения в них были бы равны процентным падениям напряжения в сопротивлениях действительной обмотки. Таким образом, если числа витков первичной и вторичной обмоток w_1 и w_2, то

при приведении вторичной обмотки к первичной необходимо электродвижущую силу ее умножить на отношение $\frac{w_1}{w_2} = u$, т. е. положить равной

$$E_2' = E_2 u = E_1.$$

Так как мощность трансформатора при приведении вторичной обмотки к первичной не должна измениться, т. е. должно сохраниться равенство $E_2 I_2 = E_2' I_2'$, где E_2 и I_2 относятся к действительной обмотке, а E_2' и I_2' — к приведенной, то для определения тока приведенной вторичной обмотки ток действительной вторичной обмотки необходимо разделить на отношение $\frac{w_1}{w_2}$, т. е. положить ток приведенной обмотки равным

$$I_2' = \frac{I_2}{u},$$

ибо в этом случае

$$E_2' I_2' = E_2 u \frac{I_2}{u} = E_2 I_2.$$

Так как, далее, падения напряжения в активном и реактивном сопротивлениях приведенной вторичной обмотки R_2' и x_2' должны составлять тот же процент от электродвижущей силы, что и у реальной вторичной обмотки, то

$$I_2 R_2 : E_2 = I_2' R_2' : E_2'$$

и

$$I_2 x_2 : E_2 = I_2' x_2' : E_2'.$$

Подставляя

$$E_2' = E_2 u; \quad I_2' = \frac{I_2}{u},$$

получаем

$$R_2' = R_2 u^2; \quad x_2' = x_2 u^2,$$

т. е.

при приведении вторичных сопротивлений к первичной обмотке их нужно умножить на u^2.

В таком случае полное сопротивление приведенной вторичной обмотки будет

$$z_2' = \sqrt{R_2'^2 + x_2'^2} = u^2 z_2,$$

где z_2 — полное сопротивление действительной вторичной обмотки.

Если бы требовалось привести первичную обмотку ко вторичной, то пришлось бы величину первичной электродвижущей силы разделить, а величину первичного тока умножить на коэфициент трансформации u, т. е. положить

$$E_1' = E_2 = \frac{E_1}{u};$$

$$I_1' = I_2 = I_1 u.$$

Так как падение напряжения в первичной приведенной обмотке должно составлять тот же процент от приведенного первичного напряжения, что то же падение в неприведенной первичной обмотке от первичного напряжения, т. е.

$$\frac{I_1' z_1'}{E_1'} = \frac{I_1 z_1}{E_1},$$

то полное сопротивление первичной обмотки, приведенной ко вторичной, будет

$$z_1' = \frac{z_1}{u^2}.$$

Приведя вторичную обмотку к первичной, нетрудно затем построить диаграмму сложения электродвижущих сил как для вторичной, так и для первичной обмоток, помня, что вторичная эле-

ктродвижущая сила за вычетом падений напряжения в сопротивлениях дает вторичное напряжение, а первичная электродвижущая сила вместе с падениями напряжения в первичной обмотке уравновешивается первичным напряжением.

§ 30. Диаграмма электродвижущих сил и токов трансформатора, работающего на активную нагрузку.

Диаграмма для данного случая (рис. 83) строится по частям: сначала для вторичной цепи, а затем для первичной цепи. Вторичная электродвижущая сила E_2' уравновешивает все падения напряжения во вторичной цепи, включая падение напряжения во внешней цепи. На этом основании можно написать

$$I_2' = \frac{E_2'}{\sqrt{(R_2' + R')^2 + x_2'^2}},$$

или

$$E_2'^2 = I_2'^2(R_2' + R')^2 + I_2'^2 x_2'^2.$$

В этих выражениях I_2' — ток вторичной цепи, приведенный к первичной цепи; R_2' и x_2' — приведенные активное и реактивное сопротивления вторичной обмотки; R' — активное сопротивление внешней цепи (например ламп накаливания), приведенное к первичной цепи.

Из второго равенства следует, что вектор электродвижущей силы E_2' является гипотенузой прямоугольного треугольника, у которого катеты равны векторам падений напряжений в активном и реактивном сопротивлениях вторичной цепи. Имея это в виду, построение диаграммы ведем в следующем порядке. Откладываем по горизонтали вправо вектор главного магнитного потока $\overline{Oa} = \Phi$. Под углом 90° в сторону отставания откладываем вектор Oc, равный вторичной электродвижущей силе E_2'; тот же вектор изобразит нам и первичную электродвижущую силу E_1. Описываем на векторе Oc как на диаметре полуокружность, и отрезком cf, равным падению напряжения в реактивном сопротивлении вторичной обмотки $I_2'x_2'$ делаем засечку из точки c на окружности в точке f. Тогда отрезок Of будет равен падению напряжения в активных сопротивлениях вторичной обмотки и внешней цепи $I_2'(R_2' + R')$. Если теперь от точки f отложить отрезок fg, равный падению напряжения только в активном сопротивлении вторичной обмотки $I_2'R_2'$, то отрезок Og даст нам падение напряжения в активном сопротивлении внешней цепи $I_2'R'$, равное вторичному напряжению V_2'. Таким образом мы получаем вторичное напряжение в виде вектора Og, смещенного на угол θ_2 в сторону запаздывания относительно вектора вторичной электродвижущей силы $E_2' = Oc$. Это смещение вызвано падением напряжения в полном сопротивлении вторичной обмотки, равном $I_2'z_2' = \overline{gc}$.

С вектором вторичного напряжения Og совпадает и вектор вторичного тока, ибо мы рассматриваем нагрузку чисто активную. На рис. 83b в некотором масштабе отрезок Od изображает нам вектор вторичного тока I_2'. Зная направление вектора вторичного тока, мы можем около точки O нанести векторы падений напряжения в реактивном сопротивлении вторичной обмотки $\overline{Op} = I_2'x_2'$ и в активном сопротивлении той же обмотки $\overline{Ot} = I_2'R_2'$; первый вектор отстает от вектора вторичного тока на 90°, второй прямо противоположен ему. Соответственно направлениям этих векторов даются направления векторам fc и fg, изображающим те же падения напряжения.

Для того чтобы построить диаграмму электродвижущих сил для первичной цепи, мы должны найти вектор первичного тока по величине и по фазе. Это нетрудно сделать, имея в виду, что намагничивающий ток I_0, изображенный на рис. 83b вектором Ob, и при нагрузке трансформатора остается почти неизменным. В таком случае построением параллелограмма $Odbe$ мы найдем вектор первичного тока $\overline{Oe} = I_1$ по величине и по фазе. Имея на диаграмме вектор первичного тока, наносим около точки O векторы падений напряжения в реактивном сопротивлении первичной обмотки $\overline{On} = I_1x_1$ и в активном сопротивлении той же обмотки $\overline{Os} = I_1R_1$.

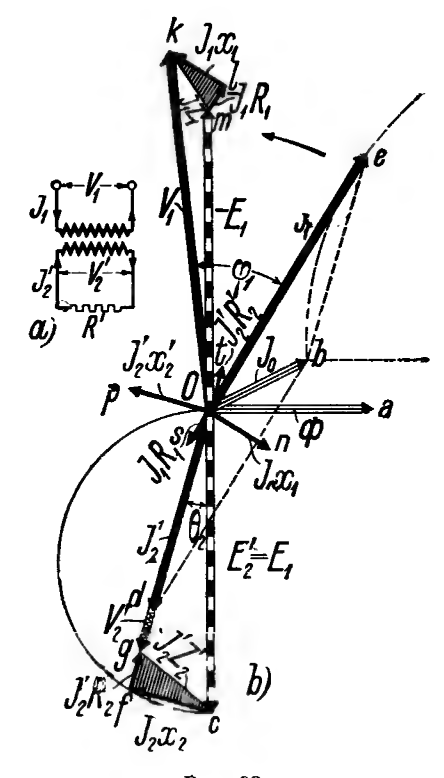


Рис. 83.

Так как первичное напряжение должно уравновесить оба падения напряжения и электродвижущую силу первичной обмотки, то оно должно иметь составляющие, уравновешивающие названные три величины. На рис. 83b вектор $\overline{Om} = -E_1$ и представляет собой составляющую напряжения, уравновешивающую первичную электродвижущую силу E_1, изображенную на том же рисунка вектором $\overline{Oe}$. Приложив к вектору Om векторы $\overline{ml} = -I_1R_1$ и $\overline{lk} = -I_1x_1$, изображающие составляющие первичного напряжения, уравновешивающие падения I_1R_1 и I_1x_1, мы в качестве замыкающей получим вектор первичного напряжения $\overline{Ok} = V_1$.

Из построенной диаграммы видно, что, несмотря на то, что нагрузка вторичной цепи чисто активная, первичный ток I_1 все же запаздывает относительно первичного напряжения V_1 на некоторый угол φ_1. Это запаздывание вызывается реактивными сопротивлениями обмоток трансформатора. В действительности угол φ_1 при активной нагрузке трансформатора значительно меньше получившегося на рис. 83b, так как для ясности рисунка намагничивающий ток I_0 взят преувеличенным.

На диаграмме рис. 83b вектор $\overline{cf} = I_2' x_2'$ пропорционален вторичному току I_2', ибо реактивное сопротивление x_2' для данного трансформатора есть величина постоянная. Так как угол при точке f всегда прямой, то с увеличением тока нагрузки I_2' точка f будет перемещаться по окружности вверх. Так как, далее, отрезок be, равный вектору вторичного тока I_2', всегда перпендикулярен вектору cf и ему пропорционален, то с перемещением точки f по окружности точка e будет также перемещаться по окружности, изображенной на рис. 83b пунктиром. Центр этой окружности находится на горизонтальной линии, проведенной из точки b, и на перпендикуляре, проведенном из середины отрезка $bг$. Такое положение вещей будет только при условии, что главный магнитный поток остается неизменным, т. е. остается неизменной вторичная электродвижущая сила.

Итак,

при неизменном магнитном потоке трансформатора конец вектора первичного тока при изменении вторичной нагрузки перемещается по окружности, т. е. трансформатор уподобляется в этом отношении некоторым машинам, имеющим круговую диаграмму.

На диаграмме рис. 83b все векторы переменных величин нанесены с сохранением их взаимного расположения по фазе или по времени. По этой диаграмме легко определить, в какую сторону и на какой угол взаимно смещены по времени те или иные переменные величины, характеризующие работу трансформатора. Поэтому изображенную на рис. 83b диаграмму называют *диаграммой во времени*.

§ 31. Потенциальная диаграмма трансформатора, работающего на активную нагрузку.

Потенциальная диаграмма трансформатора получается из диаграммы во времени в предположении, что током холостой работы I_0 можно пренебречь и считать первичный и вторичный токи равными и по фазе сдвинутыми на 180°. На диаграмме рис. 83b это значит, что векторы Od и Oe равны и взаимно противоположны (т. е. параллелограмм $dOeb$ превращается в прямую линию).

Если после указанного предположения повернуть нижнюю часть диаграммы рис. 83b на 180° против часовой стрелки, то вектор Oc совпадет с вектором Om, а вектор Od совпадет с вектором Oe. Если, далее, повернуть против часовой стрелки всю диаграмму так, чтобы векторы токов I_2' и I_1 были вертикальны, то получится потенциальная диаграмма в том виде, в каком она изображена на рис. 84.

Потенциальная диаграмма (или, как ее иногда называют, диаграмма Каппа) весьма наглядно иллюстрирует постепенное

уменьшение или „падение" первичного напряжения V_1 до вторичного напряжения V_2', причем это полное падение напряжения в трансформаторе изображается вектором

$$\overline{kg} = \sqrt{\overline{gn}^2 + \overline{nk}^2},$$

ибо

$$\overline{kg} = I_1 \sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (x_1 + x_2')^2}.$$

Для пояснения сказанного представим себе, что зажимы первичной и вторичной обмоток X и x трансформатора с коэфициентом трансформации, равном единице, соединены между собою, а два других зажима A и a соединены с вольтметром (рис. 85а). При холостой работе трансформатора вольтметр даст весьма малое напряжение, равное падению напряжения в первичной обмотке $I_0 z_1$, где I_0 — ток холостой работы, а z_1 — полное сопротивление первичной обмотки. Это и понятно, ибо на вольтметр с одной стороны действует первичное напряжение V_1, а с другой — почти противоположно направленное

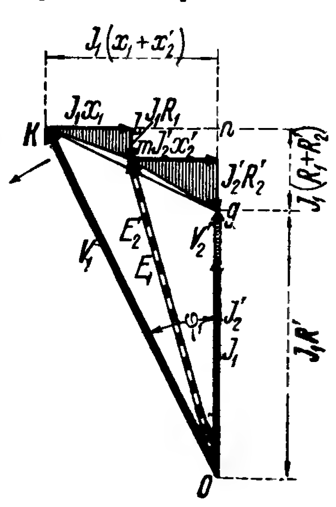


Рис. 84.

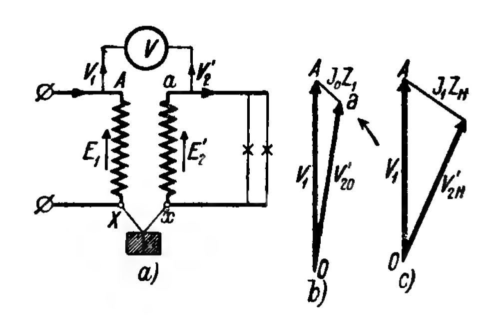


Рис. 85.

вторичное напряжение V_{20}', равное вторичной и первичной электродвижущим силам. Соединим зажимы X и x с землею, т. е. дадим этим зажимам нулевой потенциал; в таком случае потенциал зажима первичной обмотки A мы могли бы изобразить точкою A (рис. 85b), находящейся от точки нулевого потенциала O на расстоянии, равном первичному напряжению V_1, а потенциал зажима вторичной обмотки a мы должны будем изобразить точкою a, смещенной в сторону запаздывания на падение $I_0 z_1$ и находящейся от точки нулевого потенциала O на расстоянии, равном вторичному напряжению

$$V_{20}' = E_2' = E_1.$$

Нагрузим теперь трансформатор. В первичной и во вторичной обмотках появятся падения напряжения $I_1 z_1'$ и $I_2 z_2'$, вследствие чего вторичное напряжение уменьшится и не будет в той же мере, что и при холостой работе, уравновешивать первичное напряжение в его действии на вольтметр, имеющийся между зажимами A

и a (рис. 85a). Этот последний покажет бо́льшее напряжение, равное геометрической разности первичного V_1 и вторичного $V_{2н}'$ напряжений, т. е. равное полному падению напряжения в трансформаторе

$$I_1 z_1 + I_2' z_2'.$$

Если точка A попрежнему будет изображать нам потенциал зажима первичной обмотки A (а этот потенциал остается неизменным, ибо он задается генератором первичной сети), то потенциал зажима вторичной обмотки a еще дальше отодвинется в сторону запаздывания (см. рис. 85c) и именно на величину полного падения напряжения в трансформаторе.

$$I_1 z_k = I_1 \sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (x_1 + x_2')^2}.$$

§ 32. Вопросы для самопроверки.

1. Как изобразится диаграмма холостой работы трансформатора мощностью 500 kVA, $V_1 : V_2 = 425 : 13\,000$ V, $f = 25$ Hz, если известно, что активное сопротивление первичной обмотки его $R_1 = 0{,}00166$ Ω, реактивное сопротивление той же обмотки $x_1 = 0{,}15$ Ω, ток холостой работы (при напряжении 425 V) $I_0 = 37{,}6$ A и коэфициент мощности при холостой работе $\cos\varphi_0 = 0{,}16$?
2. Как изобразится диаграмма (во времени) указанного в п. 1 трансформатора при активной нагрузке 500 kW, если дополнительно известно, что активное и реактивное сопротивления вторичной обмотки соответственно равны $R_2 = 1{,}6$ Ω и $x_2 = 14{,}5$ Ω?
3. Как изобразится потенциальная диаграмма указанного в п. 2 трансформатора при активной нагрузке 500 kW?

ГЛАВА ВОСЬМАЯ.

ДИАГРАММЫ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩИХ СИЛ И ТОКОВ ТРАНСФОРМАТОРА.

§ 33. Диаграммы электродвижущих сил и токов трансформатора, работающего на индуктивную нагрузку.

Диаграмма во времени для рассматриваемого случая изображена на рис. 86b. Диаграмма строится совершенно так же, как и в первом случае. На векторе вторичной электродвижущей силы $Oc = E_2'$ как на диаметре описывается полуокружность; затем из точки c на окружности делается засечка отрезком cs, равным падению напряжения в реактивных сопротивлениях как вторичной обмотки x_2', так и внешней цепи X', т. е. равным $I_2'(x_2' + X')$. Отрезок Os даст нам падение напряжения в активных сопротивлениях вторичной обмотки R_2' и внешней цепи R'. Если мы выделим падения напряжения в одной вторичной обмотке, отложив отрезок $\overline{cf} = I_2' x_2'$ и $\overline{fg} = \overline{sq} = I_2' R_2'$, то получим отрезок cg, равный падению напряжения в полном сопротивлении вторичной обмотки $I_2' z_2'$ и отрезок Og, равный вторичному напряжению V_2'. Это напряжение уравновешивает падение напряжения в реактивном сопротивлении внешней цепи $I_2' X' = \overline{gq}$ и в активном сопротивлении той же цепи $I_2' R' = \overline{Oq}$.

Вектор вторичного тока совпадает с активным падением напряжения и изображен на рис. 86b отрезком Od. Вектор первичного тока Oe находится построением параллелограмма $Odbe$. Вектор первичного напряжения находится как замыкающий вектор полигона $Omlk$, построенного из составляющих напряжения, уравновешивающих первичную электродвижущую силу E_1 и падений напряжений в первичной обмотке $I_1 R_1$ и $I_1 x_1$.

Рис. 86.

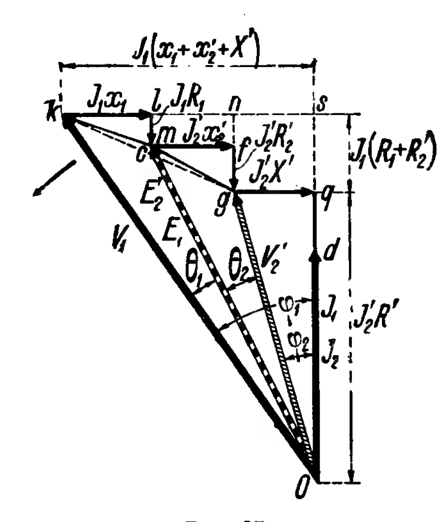


Рис. 87.

Если пренебречь намагничивающим током, т. е. положить $I_1 = I_2'$ и повернуть нижнюю часть диаграммы на 180°, а затем повернуть всю диаграмму так, чтобы векторы токов были направлены по вертикали, то мы получим потенциальную диаграмму, изображенную на рис. 87. Полное падение напряжения в трансформаторе определяется попрежнему вектором kg.

Рассматривая последнюю диаграмму, мы видим, что вектор первичного напряжения $\overline{Ok}$ равен $\sqrt{(\overline{kn} + \overline{ns})^2 + (\overline{sq} + \overline{qO})^2}$, где сумма $\overline{kn} + \overline{ns}$ представляет собою падение напряжения в реактивном сопротивлении всей цепи трансформатора, включая внешнюю цепь, а сумма $\overline{sq} + \overline{qO}$ представляет собою падение напряжения в активном сопротивлении той же цепи. Цепь трансформатора с внешней

нагрузкою мы можем, следовательно, заменить эквивалентною цепью, в которой все сопротивления включены последовательно и первичный ток проходит через всю цепь, ибо диаграмма рис. 87 получена в предположении, что $I_1 = I_2'$. В действительности у первичного тока, как мы видели ранее, имеется, кроме составляющей, компенсирующей действие вторичного тока I_2', есть составляющая, создающая намагничивающий поток, равная намагничивающему току $I_0 = E_1 Y_0 = E_1 \cdot \sqrt{g_0^2 + b_0^2}$, где g_0 и b_0 — активная и реактивная проводимости трансформатора при холостой работе. Намагничивающий ток проходит только в первичной обмотке и вызывает падения только в ней одной. Включив после сопротивлений R_1 и x_1 параллельно добавочную цепь с активною и реактивною проводимостями g_0 и b_0, мы получим полную эквивалентную схему трансформатора при нагрузке (рис. 88). Диаграмма, изображенная на рис. 87, целиком приложима и к цепи рис. 88.

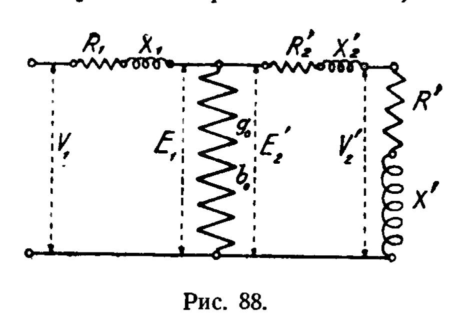


Рис. 88.

§ 34. Диаграммы электродвижущих сил и токов трансформатора, работающего на емкостную нагрузку.

Диаграмма во времени для рассматриваемого случая изображена на рис. 89. На этой диаграмме вектор $\overline{cs}$ изображает разность падений вторичного напряжения в реактивном — емкостном сопротивлении внешней цепи X_C' и в реактивном — индуктивном сопротивлении вторичной обмотки x_2', т. е. величину $I_2'(X_C' - x_2)$. Вектор же Os изображает падение напряжения в активном сопротивлении внешней цепи $I_2' R' = \overline{Oq}$ и в активном сопротивлении вторичной обмотки $I_2' R_2' = \overline{qs}$. Вектор Od изображает вторичный ток I_2': он совпадает с вектором Os. Вектор Og изображает вторичное напряжение V_2', смещенное в сторону запаздывания относительно вторичной электродвижущей силы E_2' на угол Θ_2, вследствие падения во вторичной обмотке $I_2' z_2' = gc$. Вектор Oe изображает первичный ток I_1. Вектор Ok изображает первичное напряжение V_1.

Как видно из диаграммы, в рассматриваемом случае емкостная нагрузка во вторичной цепи настолько значительна, что поглощает индуктивность обеих обмоток трансформаторов и смещает первичный ток в сторону опережения относительно первичного напряжения.

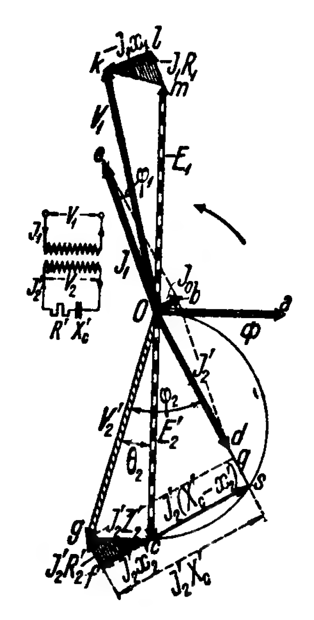


Рис. 89.

На рис. 90 изображена потенциальная диаграмма для случая емкостной нагрузки. Из последней диаграммы видно, что вторичное напряжение при емкостной нагрузке незначительно отличается от первичного напряжения (сравнить с диаграммою рис. 87 для индуктивной нагрузки). Из той же диаграммы видно, что угол $\varphi_1 < \varphi_2$.

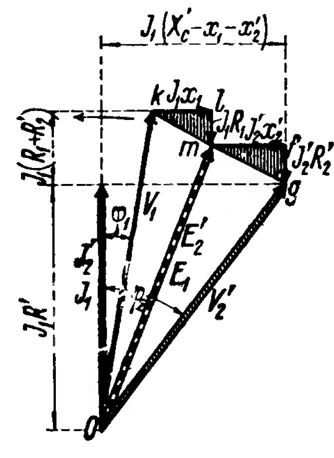


Рис. 90.

§ 35. Работа трансформатора при постоянном вторичном токе и при переменном коэфициенте мощности во вторичной цепи.

Чтобы выявить работу трансформатора при разных степенях и характере реактивности нагрузки, т. е. при разных коэфициентах мощности $\cos\varphi_2$ и нагрузках — индуктивной и емкостной, предположим, что первичное напряжение трансформатора постоянно, а полное сопротивление внешней цепи так меняется, что некоторый ток нагрузки остается также постоянным. В таком случае треугольник $\overline{kng}$, стороны которого пропорциональны току, и вектор $\overline{kO}$, равный первичному напряжению (рис. 87), остаются неизменными при из-

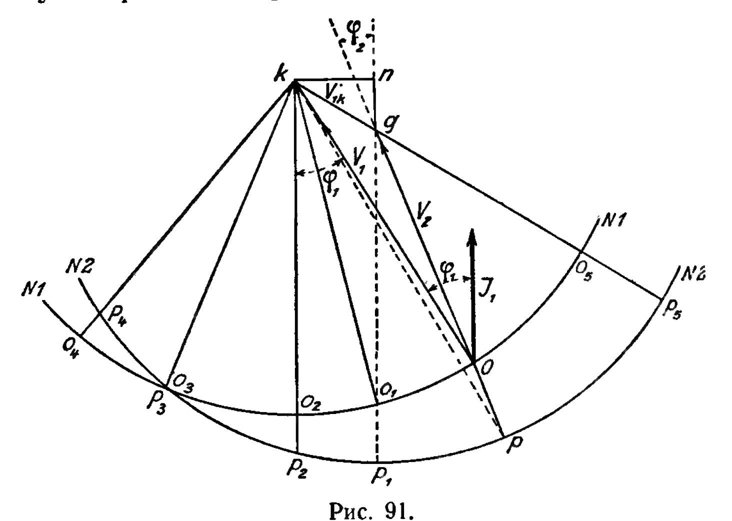


Рис. 91.

менении характера вторичной нагрузки. Опишем из точек k и g (рис. 91) окружности $N1$ и $N2$ одним и тем же радиусом $kO = V_1$. Тогда отрезок $\overline{Op}$ с большою точностью (ибо стороны треугольника kng весьма малы сравнительно с отрезком kO) даст разность $V_1 - V_2'$ при данном угле φ_2 сдвига вторичного тока относительно вторичного же напряжения, т. е. этот отрезок Op,

даст изменение вторичного напряжения при переходе от холостой нагрузки к той, при которой проходит заданный неизменный ток I_2' и имеется угол сдвига φ_2.

Если индуктивность нагрузки возрастает, т. е. угол увеличивается, то точка O на рис. 91 перемещается вправо. Вследствие этого понижение вторичного напряжения возрастает. Наоборот, при уменьшении индуктивности нагрузки точка O на рис. 91 будет перемещаться влево, и понижение вторичного напряжения уменьшается. Понижение вторичного напряжения при активной нагрузке, т. е. при $\varphi_2=0$, определяется отрезком $\overline{O_1p_1}$. При изменении характера реактивности нагрузки с индуктивной на емкостную точка O перемещается влево от точки O_1, и понижение вторичного напряжения убывает. В положении точки O_3 вторичное напряжение при нагрузке равно тому же напряжению при холостой работе. Дальнейшее возрастание емкостной реактивности повышает уже вторичное напряжение.

Совершенно так же мы могли бы исследовать изменение первичного напряжения при постоянном вторичном напряжении. Считая отрезок gp равным вторичному напряжению V_2', а отрезок kp — равным первичному напряжению V_1 при токе, для которого построен треугольник kng, легко видеть, что те же отрезки $\overline{Op}$ дадут необходимые изменения первичного напряжения, для того чтобы поддержать вторичное напряжение постоянным при разных степенях и характере реактивности нагрузки.

§ 36. Работа трансформатора при короткозамкнутой вторичной обмотке.

Под „нормальным" установившимся коротким замыканием трансформатора подразумевается такое его состояние, при котором вторичная обмотка замкнута накоротко или же на амперметр небольшого сопротивления, а к первичной обмотке подведено такое (небольшое) напряжение, при котором ток вторичной обмотки равен нормальному нагрузочному току. Так как при коротком замыкании трансформатора вторичное напряжение равно нулю, то электродвижущая сила вторичной обмотки уравновешивает только падения напряжения в ней самой $I_2'R_2'$ и $I_2'x_2'$. Для получения такой, весьма небольшой, электродвижущей силы требуется незначительный магнитный поток, а следовательно, и незначительный намагничивающий ток. Поэтому при коротком замыкании первичный ток отличается по величине от вторичного тока еще меньше, чем при нормальной работе, а угол расхождения их по фазе равен почти 180°.

На рис. 92a изображена диаграмма электродвижущих сил и токов для короткозамкнутого трансформатора. На этой диаграмме вектор $\overline{Oc}$ изображает приведенную к первичной обмотке вторичную электродвижущую силу (равную первичной э. д. с.), уравновешивающую падения напряжения в активном и реактивном сопротивлениях вторичной обмотки $I_2'R_2'$ и $I_2'x_2'$, изображенных на диаграмме векторами Of и cf. Векторами $\overline{Od}$ и Oc изображены

вторичные и первичные токи I_2' и I_{1k} и вектором Ok — первичное напряжение V_{1k}.

На рис. 92b приведена потенциальная диаграмма трансформатора при коротком замыкании, полученная как результат совмещения нижней части диаграммы рис. 92a с верхней ее частью при условии, что намагничивающий ток равен нулю.

Из последней диаграммы следует, что первичное напряжение при коротком замыкании

$$V_{1k}=\overline{Ok}=I_{1k}\sqrt{(R_1+R_2')^2+(x_1+x_2')^2}=I_{1k}\sqrt{R_k^2+x_k^2}=I_{1k}z_k,$$

где $R_k=R_1+R_2'=R_1+u^2R_2$ и $x_k=x_1+u^2x_2$ представляют полные активное и реактивное сопротивления трансформатора, а $z_k=$

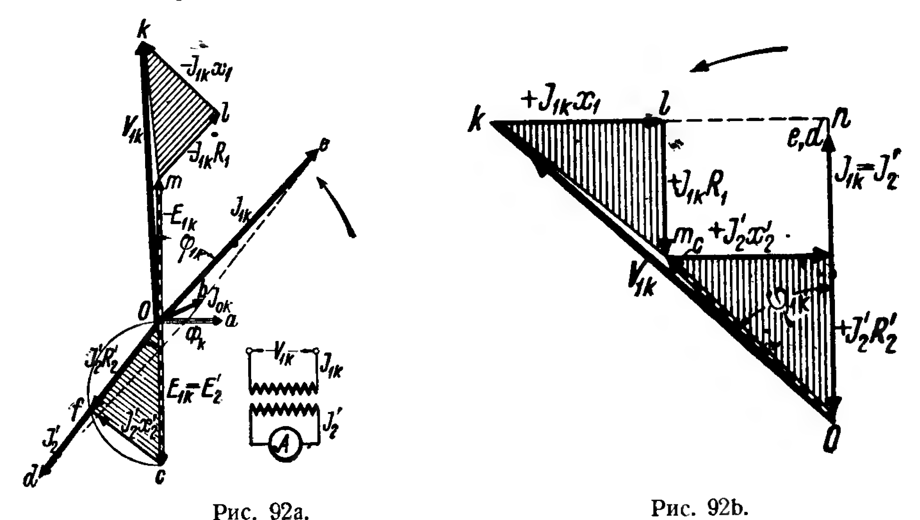


Рис. 92a. Рис. 92b.

$=\sqrt{R_k^2+x_k^2}$ — полное сопротивление трансформатора. Эти сопротивления часто называются сопротивлениями короткого замыкания, а треугольник Okn, у которого один катет $\overline{kn}=I_{1k}x_k$ представляет собою полное реактивное падение напряжения, а другой катет $\overline{On}=I_{1k}R_k$ — полное активное падение напряжения, называется обычно треугольником короткого замыкания трансформатора.

То первичное напряжение, которое дает при коротком замыкании трансформатора нормальные токи в обмотках, называется обычно **нормальным напряжением короткого замыкания трансформатора**.

Величина нормального напряжения короткого замыкания зависит главным образом от реактивного сопротивления трансформатора, так как активное сопротивление его обычно весьма мало. Практически можно считать $V_{1k}\approx I_{1k}x_k$.

Обычно величину нормального напряжения короткого замыкания выражают в процентах от нормального первичного напряжения и считают ее характернейшим параметром трансформатора, ток как этой величиной определяется, во-первых, ток трансформатора при

случайных коротких замыканиях во время его эксплоатации и, во-вторых, способность его работать параллельно с другими трансформаторами. У небольших трансформаторов, главным образом осветительных, напряжение короткого замыкания равно 1—4%, а у больших силовых трансформаторов высокого напряжения оно равно 4—10% от нормального напряжения.

Угол сдвига первичного тока I_{1k} относительно напряжения φ_{1k} определяется из соотношения $\operatorname{tg}\varphi_{1k}=\frac{x_k}{R_k}$. Необходимо заметить, что этот угол довольно велик, так как при коротком замыкании весь поток, отвечающий первичному напряжению, кроме небольшой доли, необходимой для создания электродвижущей силы, преодолевающей активное сопротивление обмоток, вынужден замыкаться через воздух, т. е. превращаться в поток первичного и вторичного рассеяния. Чем меньше активное сопротивление обмоток R_k, тем больше угол φ_{1k}. При идеальном коротком замыкании, т. е. при $R_k=0$, угол $\varphi_{1k}=90°$, ибо весь поток, вследствие размагничивающего действия вторичной обмотки, превращается в поток рассеяния.

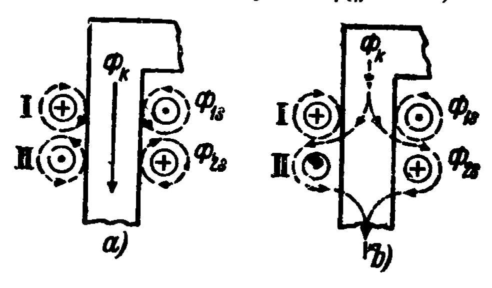


Рис. 93.

На рис. 93a изображена воображаемая нами картина замыкания магнитных потоков в короткозамкнутом трансформаторе при условии, что активные сопротивления обмоток равны нулю. На этом рисунке I и II — катушки первичной и вторичной обмоток; Φ_{s1} и Φ_{s2} — потоки рассеяния первичной и вторичной обмоток; Φ_k — поток, проходящий в сердечнике и пронизывающий вторичную обмотку. Поток Φ_k индуктирует во вторичной обмотке электродвижущую силу E_2, которая уравновешивает электродвижущую силу от поля рассеяния $E'_{s2}=I'_2 x'_2$. Так как при равенстве витков первичной и вторичной обмоток названные электродвижущие силы равны между собою, то, очевидно, поле Φ_k в этом случае равно полю рассеяния Φ_{s2}. Если принять, что реактивные сопротивления первичной и вторичной обмоток одинаковы, то поток Φ_k равен потоку рассеяния первичной обмотки. Следовательно, общий поток, пронизывающий первичную обмотку, будет вдвое больше потока в сердечнике, т. е.

$$\Phi_k+\Phi_{s1}=2\Phi_k.$$

Изображенная на рис. 93a картина проходящих потоков является воображаемой картиной. Действительная картина проходящих потоков изображена на рис. 93b. Как видно из рисунка, силовые линии потока Φ_k, благодаря противодействию вторичной обмотки, отожмутся в обе стороны и не пройдут внутри вторичной обмотки. Так как, однако, вторичная обмотка имеет активное сопротивление, то некоторый магнитный поток внутри обмотки будет проходить. Этот поток будет индуктировать в обмотке

электродвижущую силу, равную падению напряжения в активном ее сопротивлении $I'_2 R'_2$.

При одном и том же вторичном токе треугольник короткого замыкания равен треугольникам kgn (рис. 84 и 87), т. е. на последних рисунках отрезок $\overline{kg}=I_1 z_k=V_{1k}$ представляет собою падение напряжения в трансформаторе. Это обстоятельство дает возможность находить вторичное напряжение по заданному первичному, пользуясь опытом короткого замыкания трансформатора, т. е. определяя первичное напряжение V_{1k} при заданном токе в обмотках короткозамкнутого трансформатора. Если при этом измерить и поглощаемую трансформатором мощность, то можно найти и полные активное и реактивное сопротивления его. В самом деле, при коротком замыкании магнитный поток, пронизывающий железо сердечника мал, а потому потери в железе также малы. Считается, что

вся поглощаемая трансформатором мощность при коротком замыкании расходуется на нагрев обмоток.

Следовательно, можно положить, что эта мощность

$$P_{1k}=I_{1k}^2 R_k,$$

откуда

$$R_k=\frac{P_{1k}}{I_{1k}^2}.$$

Из треугольника короткого замыкания следует далее, что

$$x_k=\frac{1}{I_{1k}}\sqrt{(V_{1k}^2-I_{1k}^2 R_k)}.$$

§ 37. Принцип наложения короткого замыкания на холостую работу трансформатора.

При исследовании многих физических явлений часто поступают так: изучают действие разных причин, каждой в отдельности, независимо от того, существуют ли другие причины, оказывающие влияние на явление или нет, и затем, суммируя действия всех причин, другими словами, налагая их друг на друга, получают окончательное течение явления. Такой метод исследования носит название метода наложения. Им мы часто пользуемся при рассмотрении и количественном учете явлений в электрических цепях. Складывая и разлагая токи, напряжения, магнитные поля и т. д., мы, в сущности, применяем метод наложения. Говоря о составляющих напряжения, мы предполагаем, что эти составляющие создают токи в цепи независимо от того, имеются ли другие напряжения или нет; говоря о падениях напряжения в цепи, мы предполагаем, что какое-либо падение существует независимо от того, существует ли другое падение или нет. Для получения оконча-

тельного эффекта мы складываем затем следствия действия всех слагающих.

С точки зрения наложения явлений, нормальную работу трансформатора можно рассматривать как наложение на состояние его холостой работы состояния его работы при коротком замыкании. В самом деле, обращаясь к напряжениям обмоток, мы видим следующее. При холостой работе вторичное напряжение V_2' весьма мало отличается от первичного напряжения V_{10}. Если мы, начиная с этого состояния, будем повышать вторичный ток до нормального его значения I_2', то для поддержания вторичного напряжения тем же, равным V_2', нам придется повышать первичное напряжение, так как появится падение напряжения в трансформаторе. При нормальном токе I_1 первичное напряжение V_1 уже не равно V_2'; а равно геометрической сумме V_2' и полного падения в трансформаторе $I_1 z_k$ (см. рис. 87), т. е.

$$\overline{V}_1 = \overline{V}_2' + \overline{I_1 z_k},$$

$$\overline{V}_1 = \overline{V}_{10} + \overline{I_1 z_k}.$$

Таким образом, со стороны напряжения режим работы трансформатора при нормальной нагрузке мы можем рассматривать так, как будто на режим холостой работы наложен режим короткого замыкания, ибо $I_1 z_k$ есть не что иное, как первичное напряжение короткозамкнутого трансформатора при токе I_1.

То же самое получается и со стороны токов. При коротком замыкании первичный ток почти равен вторичному, так как намагничивающий ток равен нулю. Если мы, начиная с этого состояния, будем повышать напряжение, поддерживая при этом вторичный ток I_2' постоянным, то первичный ток возрастет, так как с увеличением первичного напряжения будет возрастать намагничивающий ток. При нормальном вторичном напряжении V_2', а следовательно, первичном V_1, первичный ток будет равен геометрической сумме тока I_2' и намагничивающего тока I_0 (см. рис. 86), т. е.

$$\overline{I}_1 = \overline{I}_2' + \overline{I}_0.$$

Таким образом, и со стороны токов нормальный режим работы трансформатора мы можем представить себе как совмещение режимов холостой работы и короткого замыкания.

§ 38. Вопросы для самопроверки.

1. Как изобразится диаграмма во времени трансформатора мощностью 500 kVA; $V_1 : V_2 = 425 : 13000$ V; $f = 25$ Hz при индукционной нагрузке 400 kW и $\cos\varphi = 0{,}8$, если известно, что активные сопротивления первичной и вторичной обмоток $R_1 = 0{,}0016\ \Omega$ и $R_2 = 1{,}6\ \Omega$, реактивные сопротивления этих обмоток $x_1 = 0{,}015\ \Omega$ и $x_2 = 14{,}5\ \Omega$ и ток холостой работы со стороны обмотки низшего напряжения $I_0 = 37{,}6$ A?

2. Как изобразится потенциальная диаграмма указанного в п. 1 трансформатора при активной нагрузке 400 kW?

3. У трансформатора 500 kVA; 11 000 : 2300 V при частоте 50 Hz активные сопротивления первичной и вторичной обмоток соответственно равны $R_1 = 0{,}81\ \Omega$ и $R_2 = 0{,}036\ \Omega$, а реактивные сопротивления соответственно равны $x_1 = 3{,}7\ \Omega$ и $x_2 = 0{,}162\ \Omega$. Какое напряжение нужно приложить к обмотке высшего напряжения, чтобы при коротком замыкании обмотки низшего напряжения в обмотках проходили нормальные токи?

4. Для трансформатора 1000 kVA; 66 000 : 6600 V при частоте 50 Hz имеются следующие данные опыта короткого замыкания: $I_{1k} = 15{,}1$ A, $V_{1k} = 3240$ V и $P_{1k} = 7490$ W. Предполагается, что активные сопротивления первичной и вторичной обмоток равны, если отнести их к какой-либо одной обмотке; точно так же равны реактивные сопротивления тех же обмоток. Каково будет вторичное напряжение при работе трансформатора с первичным током $I_1 = 15{,}1$ A и коэфициентом мощности $\cos\varphi = 0{,}8$?

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ.

ОТНОСИТЕЛЬНОЕ ИЗМЕНЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА.

§ 39. Аналитическое определение изменения напряжения трансформатора.

Трансформаторы работают обычно при постоянном первичном напряжении. Значительно реже они работают при постоянном вторичном напряжении. В первом случае с изменением нагрузки вторичное напряжение будет меняться. Во втором случае вторичное напряжение при изменении нагрузки может оставаться постоянным лишь при изменении первичного напряжения. В обоих случаях о способности трансформатора быть устойчивым в отношении напряжения судят по так называемому относительному изменению напряжения (или степени регулирования). При работе трансформатора с постоянным первичным напряжением нормы Американского института инженеров-электриков и Союза германских электротехников под изменением напряжения подразумевают повышение вторичного напряжения при переходе от номинальной нагрузки при заданном коэфициенте мощности к холостой при условии постоянства первичного напряжения и частоты. Но американские нормы берут это повышение в процентах от номинального вторичного напряжения при нагрузке, а немецкие нормы — в процентах от вторичного напряжения при холостой работе. Следовательно, если V_{20} и $V_{2н}$ — вторичные напряжения при холостой работе и при номинальной нагрузке, то по американским нормам относительное изменение напряжения будет

$$\Delta V_2 = \frac{V_{20} - V_{2н}}{V_{2н}} \cdot 100\%,$$

а по немецким нормам

$$\Delta V_2 = \frac{V_{20} - V_{2н}}{V_{20}}\, 100\%.$$

По нормам IX ВЭС (1928 г.) под изменением напряжения трансформатора подразумевается разность между номинальным вторичным напряжением (т. е. вторичным напряжением при холостой работе) и напряжением, устанавливающимся на вторичной обмотке при номинальной вторичной силе тока, номинальной частоте и номинальном первичном напряжении. Это изменение напряжения трансформатора определяется в процентном отношении к номинальному вторичному напряжению, т. е. к вторичному напряженню при холостой работе. Следовательно, по нормам IX ВЭС

$$\Delta V = \frac{V_{20} - V_{2н}}{V_{20}}.$$

Так как вторичное напряжение при холостой работе при обычных условиях работы трансформаторов, т. е. при не очень низких значениях коэфициента мощности, сравнительно мало отличается от вторичного напряжения при номинальной нагрузке, то численной разницы в процентных понижениях напряжений по американским, немецким и нашим нормам почти нет.

Пользуясь потенциальною диаграммою трансформатора, нетрудно найти выражение, по которому можно было бы простым вычислением определить относительное понижение напряжения. В самом деле, имея в виду, что при холостой работе трансформатора вторичное напряжение V_{20}, приведенное к первичной обмотке, почти равно первичному напряжению V_1, получаем

$$\Delta V_1 = \frac{V_{20} - V_{2н}}{V_{2н}} = \frac{V_1 - V_{2н}}{V_{2н}}.$$

Рис. 94.

На основании потенциальной диаграммы, построенной для индукционной нагрузки (рис. 94), имеем

$$\Delta V_1 = \frac{\overline{Ok} - \overline{Og}}{\overline{Og}} = \frac{\overline{Ok}}{\overline{Og}} - 1.$$

Продолжим линию $\overline{Og}$ до пересечения в точке t с окружностью, описанной на отрезке $\overline{kg}$ как на диаметре. Тогда

$$\overline{Ok} = \sqrt{(\overline{Og} + \overline{gt})^2 + \overline{kt}^2};$$

следовательно

$$\Delta V_1 = \frac{\sqrt{(\overline{Og} + \overline{gt})^2 + \overline{kt}^2}}{\overline{Og}} - 1,$$

или

$$\Delta V_1 = \sqrt{\left(1 + \frac{\overline{gt}}{\overline{Og}}\right)^2 + \left(\frac{\overline{kt}}{\overline{Og}}\right)^2} - 1.$$

Имея в виду, что по биному Ньютона выражение $\sqrt{a^2 + b^2}$ приближенно равно $a + \frac{b^2}{2a}$, получаем

$$\Delta V_1 = \left(1 + \frac{\overline{gt}}{\overline{Og}}\right) + \frac{1}{2\left(1 + \frac{\overline{gt}}{\overline{Og}}\right)} \cdot \left(\frac{\overline{kt}}{\overline{Og}}\right)^2 - 1.$$

Так как величина $\frac{\overline{gt}}{\overline{Og}}$, имеющаяся в знаменателе второго слагаемого, весьма мала сравнительно с единицей, то можно написать

$$\Delta V_1 = \frac{\overline{gt}}{\overline{Og}} + \frac{1}{2}\left(\frac{\overline{kt}}{\overline{Og}}\right)^2.$$

Опустив из точки $\overline{n}$ перпендикуляры на линию Ot и на продолжение линии kt и имея в виду, что угол $tkn = \varphi_2$, получаем

$$\overline{gt} = \overline{ge} + \overline{et} = \overline{ge} + \overline{nf} = \overline{gn}\cos\varphi_2 + \overline{kn}\sin\varphi_2;$$

$$\overline{kt} = \overline{kf} - \overline{tf} = \overline{kf} - \overline{en} = \overline{kn}\cos\varphi_2 - \overline{ng}\sin\varphi_2.$$

Положив отношения

$$\frac{\overline{gn}}{\overline{Og}} = \frac{I_1 R_k}{V_{2н}'} = e_r; \quad \frac{\overline{kn}}{\overline{Og}} = \frac{I_1 x_k}{V_{2н}'} = e_x,$$

получим

$$\Delta V_1 = e_r\cos\varphi_2 + e_x\sin\varphi_2 + \frac{e_x\cos\varphi_2 - e_r\sin\varphi_2}{2}.$$

Если падения напряжения I_1R_k и I_1x_k выразить в процентах от вторичного напряжения, т. е. положить

$$\frac{I_1 R_k}{V_{2н}'} 100 = e_r\,\%; \quad \frac{I_1 x_k}{V_{2н}'} 100 = e_x\,\%,$$

то получим

$$\Delta V_1\,\% = \pm(e_r\cos\varphi_2 + e_x\sin\varphi_2) + \frac{(e_x\cos\varphi_2 - e_r\sin\varphi_2)^2}{200}.$$

Отрицательный знак перед скобками берется в случае емкостной нагрузки, когда отрезок $\overline{gt}$ (рис. 94) приходится откладывать в обратную сторону по отношению к вектору $\overline{Og}$.

При активной нагрузке, когда $\varphi_2 = 0$, относительное понижение напряжения будет определяться по формуле

$$\Delta V_1\,\% = e_r + \frac{e_x^2}{200}.$$

В таком виде даны выражения для относительного изменения напряжения или степени регулирования трансформатора в нормах IX ВЭС.

В виду того, что в качестве нормального (или номинального) вторичного напряжения, согласно нормам IX ВЭС считается вторичное напряжение при холостой работе и оно помещается на щитке трансформатора, удобнее падения напряжения в трансформаторе выражать в процентах от напряжения при холостой работе, а не от напряжения при нагрузке. Это удобство будет понятно, если принять во внимание, что вторичное напряжение зависит от коэфициента мощности нагрузки, т. е. от $\cos\varphi_2$, вследствие чего его величина не может быть наперед определена. Кроме того вторичное напряжение при нагрузке незначительно (на 2—5%) отличается от вторичного же напряжения при холостой работе. Таким образом при практических расчетах можно считать

$$e_r=\frac{I_1 R_k}{V_{20}'};\quad e_x=\frac{I_1 x_k}{V_{20}'},$$

где V_{20}' — приведенное к первичной обмотке вторичное напряжение, почти равное первичному напряжению V_1.

Пример 1. Трансформатор броневого типа 240 kVA, 6000/535 V, 40,7/455 A при частоте 50 Hz имеет следующие постоянные, полученные из опыта короткого замыкания: $R_k=1{,}55\ \Omega$ и $x_k=1\ \Omega$. Определить степень регулирования при $\cos\varphi_2=1$ и $\cos\varphi_2=0{,}8$.

Решение. Отношения:

$$e_r=\frac{I_1 R_k}{V_1}\cdot 100=\frac{40{,}7\cdot 1{,}55}{6000}\cdot 100=1{,}05\%;$$

$$e_x=\frac{I_1 x_k}{V_1}\cdot 100=\frac{40{,}7\cdot 1}{6000}\cdot 100=0{,}68\%.$$

При $\cos\varphi_2=1$

$$\Delta V_1\%=e_r+\frac{e_x}{200}=1{,}05+\frac{0{,}68^2}{200}=1{,}052\%.$$

При $\cos\varphi=0{,}8$

$$\Delta V_1\%=e_r\cos\varphi_2+e_x\sin\varphi_2+\frac{(e_x\cos\varphi_2-e_r\sin\varphi_2)^2}{200}=$$

$$=1{,}05\cdot 0{,}8+0{,}68\cdot 0{,}6+\frac{(0{,}68\cdot 0{,}8-1{,}05\cdot 06)^2}{200}=1{,}24\%.$$

Следовательно, падение вторичного напряжения при $\cos\varphi_2=1$ будет

$$\Delta V_1'=\frac{535\cdot 1{,}052}{100}=5{,}7\ \text{V}$$

и при $\cos\varphi_2=0{,}8$

$$\Delta V_1''=\frac{532\cdot 1{,}24}{100}=6{,}65\ \text{V}.$$

Рассматриваемый трансформатор имеет относительно весьма небольшое реактивное сопротивление.

Пример 2. Трансформатор 7,5 kVA, 2080/208 V при частоте 50 Hz имеет следующие постоянные: $R_1=7{,}53\ \Omega$, $R_2=0{,}0662\ \Omega$, $x_1=14{,}2\ \Omega$ и $x_2=0{,}128\ \Omega$. Определить степень регулирования.

Решение. Так как коэфициент трансформации $u=10$, то сопротивления короткого замыкания будут

$$R_к=R_1+u^2R_2=7{,}53+6{,}62=14{,}15\ \Omega;$$
$$x_к=x_1+u^2x_2=14{,}2+12{,}8=27\ \Omega.$$

Первичный ток

$$I_1=\frac{7{,}5\cdot 1000}{2080}=3{,}6\ \text{A}.$$

Отношения

$$e_r=\frac{I_1 R_k}{V_{20}'}\cdot 100=\frac{51}{2080}\cdot 100=2{,}45;$$

$$e_x=\frac{I_1 x_k}{V_{20}'}\cdot 100=\frac{97}{2080}\cdot 100=4{,}65.$$

При $\cos\varphi_2=1$

$$\Delta V_1'\%=2{,}45+\frac{4{,}65^2}{200}=2{,}55\%.$$

При $\cos\varphi_2=0{,}8$

$$\Delta V_1''\%=2{,}45\cdot 0{,}8+4{,}65\cdot 0{,}6+\frac{(4{,}65\cdot 0{,}8-2{,}45\cdot 0{,}6)^2}{200}=4{,}8\%.$$

Следовательно падение вторичного напряжения при $\cos\varphi_2=1$ будет

$$\Delta V_1'=\frac{208\cdot 2{,}55}{100}=5{,}3\ \text{V},$$

а при $\cos\varphi_2=0{,}8$

$$\Delta V_1''=\frac{208\cdot 4{,}8}{100}=10\ \text{V}.$$

В нормах Союза германских электротехников под изменением напряжения трансформатора при данном коэфициенте мощности, как было указано ранее, подразумевается повышение вторичного напряжения при переходе от нормальной нагрузки к холостой работе в предположении, что первичное напряжение и частота остаются постоянными. Это повышение напряжения выражается в процентах от вторичного напряжения при холостой работе (т. е. от напряжения, определяемого по первичному напряжению через коэфициент трансформации). Таким образом, по германским нормам

$$\Delta V=\frac{V_{20}-V_{2н}}{V_{20}}\cdot 100\%.$$

Для вычисления изменения напряжения в нормах дается формула:

$$\Delta V_2=e_\varphi'+100-\sqrt{10000-e_\varphi''^2},$$

причем

$$e_\varphi' = e_r \cos\varphi_2 + e_x \sin\varphi_2,$$

$$e_\varphi'' = e_x \cos\varphi_2 - e_r \sin\varphi_2,$$

$$e_x = \sqrt{e_k^2 - e_r^2}.$$

Здесь e_r и e_x — падения напряжения в полных активном и реактивном сопротивлениях трансформатора, выраженные в процентах от вторичного напряжения при холостой работе, т. е. $e_r = 100 \cdot I_1 R_k / V_{2хол}'$, и $e_x = 100 \cdot I_1 x_k / V_{2хол}'$; e_k — напряжение короткого замыкания, выраженное в процентах от вторичного напряжения, т. е. $e_k = 100 \cdot V_k / V_{2хол}'$, если V_k — напряжения короткого замыкания; φ_2 — угол сдвига тока относительного напряжения. Если e_x мало и составляет около 4%, то можно принять $e_\varphi = e_\varphi'$.

Выражение для ΔV_2 нетрудно получить, пользуясь диаграммой рис. 94. Сделав из центра O засечки на линии Ok радиусами Og и Ot, получаем $\overline{Od} = \overline{Ot}$, $\overline{Oc} = \overline{Og}$ и $\overline{cd} = gt$. Изменение напряжения

$$\Delta V_2 = \frac{V_{20}' - V_{2н}'}{V_{20}} = \frac{Ok - Og}{Ok} \cdot 100 = \frac{Ok - Ot + cd}{Ok} \cdot 100\%,$$

или

$$\Delta V_2 = \frac{Ok - \sqrt{(Ok)^2 - (kt)^2} + cd}{Ok} \cdot 100\%.$$

Из рис. 94 следует:

$$\overline{cd} = \overline{gt} = \overline{ge} + \overline{et} = \overline{gn} \cos\varphi_2 + \overline{kn} \sin\varphi_2 = e_\varphi';$$

$$\overline{kt} = \overline{kf} - \overline{tf} = \overline{kn} \cos\varphi_2 - \overline{gn} \sin\varphi_2 = e_\varphi''.$$

Выражая e_φ' и e_φ'' в процентах от вторичного напряжения $V_{20}' = \overline{Ok}$ и подставляя в последнее равенство, получим выражения для ΔV_2 в том виде, в каком оно дается в германских нормах.

Значения относительного падения по ОСТ — 4815 см. в конце книги „Приложения“.

Следует отметить, что в отношении осветительных трансформаторов выставляется обычно требование возможно меньшего падения напряжения при изменении нагрузки от холостой до нормальной. Это требование, однако, прямо противоположно другому требованию, предъявляемому к осветительным трансформаторам, а именно требованию наименьших потерь холостого хода (или потерь в железе). Падение напряжения весьма быстро растет с уменьшением коэфициента мощности нагрузки.

§ 40. Внешняя характеристика трансформатора.

Внешняя характеристика трансформатора представляет собою зависимость между вторичным напряжением и вторичным током при постоянном первичном напряжении в постоянном сдвиге фаз напряжения и тока вторичной цепи. Внешняя характеристика дает

возможность определить падение напряжения в трансформаторе при любой нагрузке и потому играет большую роль при суждении о пригодности трансформатора для тех или иных условий работы. Согласно нормам ВЭС падение напряжения трансформатора должно даваться заводом для активной нагрузки, т. е. для $\cos\varphi_2 = 1$, и для индукционной нагрузки с $\cos\varphi_2 = 0{,}8$. Поэтому и внешнюю характеристику желательно иметь при тех же значениях $\cos\varphi_2$.

При испытании маломощных трансформаторов внешнюю характеристику можно получить непосредственно опытным путем, включая вторичную обмотку на регулируемую нагрузку.

Схема включения приборов при исследовании небольших трансформаторов изображена на рис. 95. При активной нагрузке во вторичную цепь включаются лампы накаливания или водяной реостат. (Ваттметр в этом случае полезно включить в первичную обмотку для того, чтобы определить $\cos\varphi$ всей цепи трансформатора.) При индуктивной нагрузке параллельно к лампам накаливания подключается реактивная катушка, имеющая в магнитной цепи воздушную щель, ширину которой можно произвольно менять. Последнее необходимо для того, чтобы при разных активных нагрузках поддерживать коэфициент мощности неизмененным. Большие трансформаторы нагружают синхронным двигателем, возбуждением которого и устанавливают требуемый коэфициент мощности. Коэфициент мощности нагрузки определяется по ваттметру, амперметру и вольтметру во вторичной цепи. Но его можно определить с достаточною точностью как отношение тока в цепи с активной нагрузкой к току в цепи с реактивной нагрузкой (т. е. в цепи с реактивной катушкой).

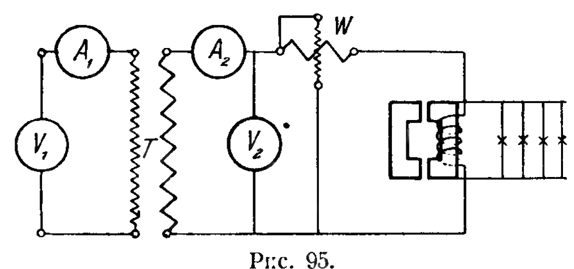


Рис. 95.

При испытании трансформаторов высокого напряжения первичною обмоткою служит обыкновенно обмотка высшего напряжения, так как измерительные приборы удобнее включать в цепь низшего напряжения.

В тех случаях, когда первичное напряжение не удается поддержать постоянным, в отсчеты вторичного напряжения и мощности необходимо ввести поправки. Если, например, первичное напряжение выше нормального на ΔV_1, то отсчет вторичного напряжения следует уменьшить на $\frac{1}{u\,\Delta V_1}$, где u — коэфициент трансформации.

При испытании мощных трансформаторов внешняя характеристика получается обычно построением по данным опытов холостой работы и короткого замыкания трансформатора. Опыт холостой работы дает нам вторичное напряжение при холостой работе V_{20}, а опыт короткого замыкания дает нам полные падения напряжения при заданном токе — $I_1 z_k$, $I_1 R_k$, $I_1 x_k$, отнесенные к первичной обмотке.

Эти падения, отнесенные к вторичной обмотке, будут равны

$$\frac{I_1 z_k}{u}, \quad \frac{I_1 R_k}{u} \text{ и } \frac{I_1 x_k}{u}.$$

Будучи выражены через вторичный ток $I_2 = uI_1$, они будут равны

$$I_2 z_k', \quad \frac{I_2 R_k}{u_2}, \quad \frac{I_2 x_k}{u^2}.$$

По данным опыта короткого замыкания строим треугольник короткого замыкания gnk (рис. 96), расположив его катет gn под заданным углом φ_2 к вертикали, проведенной из точки g. Затем из точки k отрезком kO, равным вторичному напряжению при холостой работе V_{20}', делаем засечку на вертикальной линии Og. Если из точки O провести вектор тока I_2' под углом φ_2 к вертикали Og, то мы получим потенциальную диаграмму для заданного тока I_2'. В ней отрезок Og изобразит нам вектор вторичного напряжения $V_{2н}$ при данном токе I_2' и при данном коэфициенте мощности $\cos\varphi_2$. Имея в виду, что катеты и гипотенузы треугольника короткого замыкания gnk пропорциональны току нагрузки, вторичные напряжения при других значениях вторичного тока определяем следующим построением.

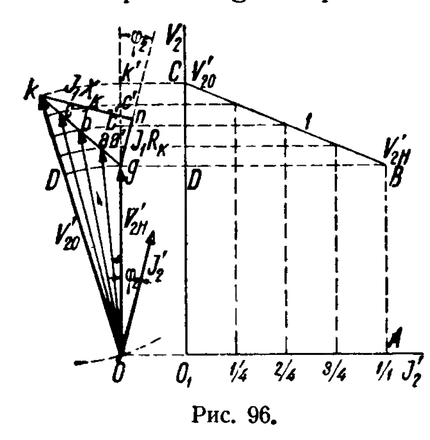


Рис. 96.

Делим гипотенузу треугольника gnk на несколько частей, например на четыре части. Тогда отрезки Oc, Ob, Oa дадут нам вторичные напряжения при вторичных токах $\frac{1}{4}I_2'$, $\frac{2}{4}I_2'$, $\frac{3}{4}I_2'$.

Чтобы построить внешнюю характеристику, берем координатную систему так, чтобы начало координат O_1 расположилось по горизонтали, проведенной из точки O, и откладываем по оси абсцисс значения тока $\frac{1}{4}$, $\frac{2}{4}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{1}$ нормального тока I_2'. Далее, из точки O, как из центра, радиусами, равными Ok, Oc, Ob, Oa делаем засечки на продолжении вектора Og и затем спроектируем полученные точки на вертикали, проведенные из соответствующих точек оси абсцисс. Соединив точки пересечения, мы получим внешнюю характеристику *1*. По внешней характеристике мы можем судить о величине относительного понижения напряжения. Согласно рис. 96 оно равно отношению

$$\frac{\overline{O_1C} - \overline{AB}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{CD}}{\overline{O_1D}}.$$

Следует иметь в виду, что в силу неизбежных неточностей графического построения внешней характеристики относительное понижение напряжения рекомендуется определять аналитическим путем.

§ 41. Коэфициенты трансформации трансформатора.

Коэфициентом трансформации трансформатора мы называли ранее отношение электродвижущих сил первичной и вторичной обмоток, равное отношению чисел последовательно соединенных витков этих обмоток, т. е. отношение

$$u_e = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}.$$

При холостой работе трансформатора его вторичное напряжение равно вторичной электродвижущей силе, а первичное напряжение весьма мало отличается от первичной электродвижущей силы. Поэтому под коэфициентом трансформации подразумевается отношение напряжений у обмоток при холостой работе, причем обычно высшего напряжения к низшему. Определенный таким образом коэфициент трансформации по электродвижущим силам следует отличать от коэфициентов трансформации по напряжениям и токам. Коэфициентом трансформации по напряжениям называется отношение первичного напряжения V_1 к вторичному напряжению $V_{2н}$, имеющему место при нормальной нагрузке, т. е. отношение

$$u_v = \frac{V_1}{V_{2н}}.$$

При индуктивной нагрузке этот коэфициент несколько меньше коэфициента трансформации по электродвижущим силам.

Коэфициентом трансформации по току называется отношение первичного тока к вторичному току при нормальной нагрузке, т. е. отношение

$$u_i = \frac{I_1}{I_2}.$$

Для практики наиболее важное значение имеет величина коэфициента трансформации по электродвижущим силам. Этот коэфициент помещается обычно на щитке трансформатора.

§ 42. Вопросы для самопроверки.

1. Чему равна степень регулирования трансформатора 25 kVA; $V_1 : V_2 = 22\,000 : 440$ V, $f = 50$ Hz, работающего на индукционную нагрузку 22 kW при коэфициенте мощности $\cos\varphi_2 = 0{,}85$, если известны данные опыта короткого замыкания: $I_{1k} = 1{,}136$ A (нормальный ток), $V_{1k} = 1020$ V и $W_{1k} = 351$ W?

2. Какова внешняя характеристика при $\cos\varphi_2 = 0{,}8$ трансформатора 1000 kVA, $V_1 : V_2 = 66\,000 : 6600$ V, если известны данные опыта короткого замыкания: $I_{1k} = 15{,}15$ A, $V_{1k} = 3240$ V, $W_{1k} = 7490$ W? Какова степень регулирования?

3. Трансформатор 50 kVA, $30\,000 : 440$ V, $f = 50$ Hz имеет следующие данные: $R_1 = 120\ \Omega$, $R_2 = 0{,}026\ \Omega$, $x_1 = 428\ \Omega$ и $x_2 = 0{,}09\ \Omega$. Какова внешняя характеристика этого трансформатора при $\cos\varphi_2 = 0{,}8$?

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ.

ВКЛЮЧЕНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА; ТРЕХОБМОТОЧНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ.

§ 43. Включение однофазного трансформатора.

Понижающие однофазные трансформаторы, работающие в распределительных сетях, имеют обычно со стороны низшего напряжения две группы обмоток, которые можно соединять между собою или параллельно — для пониженного напряжения, например 110 V, или последовательно — для повышенного напряжения, например 220 V. Наличие двух групп обмоток (у стержневого трансформатора — обмотки двух стержней) дает возможность осуществить трехпроводную систему Эдисона подключением третьего провода, так называемого нейтрального, к месту сопряжения двух групп при последовательном соединении. На рис. 97 приведена схема включения трансформатора при трехпроводной системе. Хотя ток в нейтральном проводе, при правильно распределенной между обоими плечами нагрузке, ничтожен, тем не менее сечение его должно быть достаточным, чтобы выдержать нагрузку одного плеча, если один из предохранителей крайних проводов перегорит.

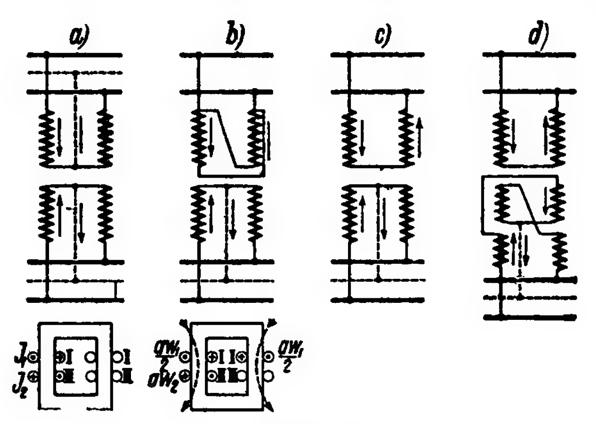


Рис. 97.

В том случае, когда со стороны первичной обмотки имеется также нейтральный провод, соединяющий трансформатор с генератором, никакого нарушения в работе трансформатора при несимметричной нагрузке со стороны вторичной цепи не будет. Пусть, например, нагрузка имеется между одним крайним проводом (рис. 97a). В таком случае ток будет проходить в катушках первичной и вторичной обмоток, находящихся на одном стержне. Магнитодвижущие силы первичной и вторичной катушек вполне скомпенсируются, и магнитное равновесие будет примерно таким же, каким оно бывает при равномерной нагрузке обоих плеч вторичной цепи. То же явление будет иметь место и тогда, когда первичные катушки обоих стержней соединены параллельно. Как видно из рис. 97b, и в этом случае токи проходят по первичной и вторичной катушкам одного и того же стержня, и потому нормальное магнитное равновесие не нарушается. В обоих случаях, следовательно, напряжение на ненагруженном плече вторичной цепи мало будет отличаться от нормального.

В том случае, когда катушки первичной обмотки соединены последовательно и нейтральный провод в первичной цепи отсутствует, односторонняя нагрузка вторичной цепи в значительной мере нарушает нормальное магнитное состояние трансформатора. В самом деле, при нагрузке одного лишь плеча вторичной цепи вторичный ток будет проходить через одну катушку, тогда как первичный ток—через обе катушки. Ампервитки первичной обмотки попрежнему равны ампервиткам вторичной обмотки. Но в то время, как ампервитки первичной обмотки распределены поровну на обоих стержнях трансформатора, ампервитки вторичной катушки — только на одном стержне (рис. 97c). В результате первичные и вторичные ампервитки стержней не уравновешивают друг друга. На рис. 97c на левом стержне превышают ампервитки вторичной обмотки, тогда как на правом стержне превышают ампервитки первичной обмотки (ибо во вторичной катушке тока нет). Вследствие неуравновешенности первичных и вторичных ампервитков появится магнитный поток рассеяния, который в обоих стержнях будет иметь одно направление и потому будет замыкаться главным образом через воздух. В первичной катушке, магнитно неуравновешенной, этот поток рассеяния вызывает большое индуктивное сопротивление. Так как в обеих первичных катушках ток один и тот же, то большая доля первичного напряжения будет на той катушке, которая магнитно не уравновешена (на рис. 97c на катушке правого стержня). Это значит, что и напряжения плеч вторичной цепи будут значительно отличаться друг от друга.

Магнитный поток рассеяния, появляющийся в результате магнитной неуравновешенности первичной и вторичной обмоток, может иметь и другое последствие, ухудшающее работу масляного трансформатора. Этот поток, замыкаясь через стенки масляного бака, может вызвать в железе стенок большие токи Фуко, нагревающие бак.

Для того чтобы устранить магнитную неуравновешенность трансформатора при несимметричной нагрузке вторичной цепи, соединяют вторичные обмотки зигзагом. С этой целью вторичную обмотку делят на четыре части и между крайними зажимами и нейтральною точкою включают последовательно четверть обмотки, находящейся на одном стержне, с четвертью обмотки, находящейся на другом стержне (рис. 97d). В этом случае вторичный ток одной половины будет действовать на обе части первичной обмотки. Вследствие этого магнитное равновесие почти не нарушается.

Чтобы сделать вторичную цепь (абонентскую) безопасной, ее рекомендуется заземлять в нейтральной точке. Если бы этого заземления не было, то при всяком соединении первичной цепи (высокого напряжения) со вторичною, произойдет ли оно в самом трансформаторе вследствие порчи изоляции или пробоя ее, или вне трансформатора от случайно упавшего провода, — вторичная цепь получает высокий потенциал первичной цепи. Прикосновение к проводу вторичной цепи человека, хорошо заземленного, в случае хорошей изоляции линии высокого напряжения, может кончиться смертью от удара зарядным током. С другой стороны, случайное заземление линии высокого напряжения приведет к про-

бою вторичной обмотки. При заземленной вторичной обмотке ни то, ни другое явление не может иметь места. Заземление именно середины вторичной обмотки объясняется тем, что при этом изоляция ее находится к земле под напряжением, равным половине полного напряжения вторичной обмотки.

§ 44. Трехобмоточные трансформаторы.

В тех случаях, когда от одной сети высокого напряжения приходится питать две сети разных напряжений, бывает экономичнее применять не два отдельных трансформатора, а один трансформатор, снабжая его двумя электрически независимыми вторичными обмотками. Подводимая к первичной обмотке мощность в этом случае равна сумме мощностей, отдаваемых обеими вторичными обмотками.

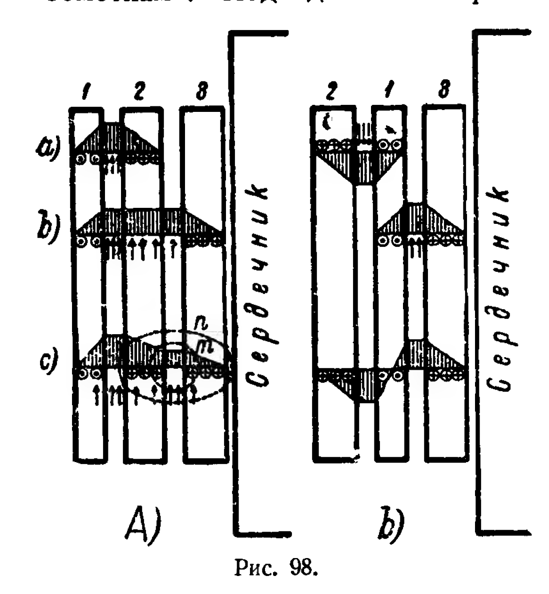


Рис. 98.

Так как обе вторичные обмотки расположены на одном и том же сердечнике, то они оказывают друг на друга влияние через свои поля рассеяния. Вследствие этого падение напряжения в какой-либо вторичной обмотке получается не только от поля рассеяния этой именно обмотки (самоиндукции), но и от поля рассеяния другой вторичной обмотки (взаимоиндукции). Таким образом на изменение напряжения одной вторичной цепи влияет нагрузка другой вторичной цепи. Степень влияния вторичных обмоток друг на друга зависит от взаимного расположения их. На рис. 98 представлены два способа расположения цилиндрических катушек первичной обмотки *1* и двух вторичных обмоток *2* и *3*. По первому способу первичная обмотка расположена снаружи, по второму способу первичная обмотка расположена между вторичными обмотками. На том же рисунке изображены кривые распределения поля рассеяния для трех случаев: *a*) когда ток проходит через вторичную обмотку *2*, *b*) когда ток проходит через вторичную обмотку *3*, *c*) когда ток проходит через обе вторичные обмотки *2* и *3*. Так как при втором способе расположения обмоток между вторичными обмотками *2* и *3* магнитная связь через поля рассеяния весьма слаба (силовые линии полей рассеяния отжимаются первичной обмоткой к самим обмоткам), то влияние одной вторичной обмотки на другую вторичную обмотку в этом случае невелико. При первом способе расположения вторичные обмотки в сильной степени связаны друг с другом полями рассеяния (см. на рис. 98a линии *n* и *m*), поэтому взаимоиндукция между ними может быть большая.

Обозначим через x_{12} реактивное сопротивление, измеренное со стороны первичной обмотки *1* при коротком замыкании обмотки *2* (случай *a* рис. 98) и при разомкнутой обмотке *3*; через x_{13} — реактивное сопротивление, измеренное со стороны первичной обмотки *1* при коротком замыкании вторичной обмотки *3* и при разомкнутой обмотке *2* (случай *b* рис. 98); через x_{23} — реактивное сопротивление, измеренное на вторичной обмотке *2* при коротком замыкании вторичной обмотки *3* и разомкнутой обмотке *1* [x_{23} отнесено к первичной обмотке *1*, т. е. умножено на $\left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2$]. В таком случае реактивное сопротивление каждой обмотки при работе всех обмоток можно определить по формулам:[1]

для первичной обмотки *1*

$$x_1 = \frac{x_{12} + x_{13} - x_{23}}{2};$$

для вторичной обмотки *2*

$$x_2 = \frac{x_{23} + x_{12} - x_{13}}{2};$$

для вторичной обмотки *3*

$$x_3 = \frac{x_{23} + x_{13} - x_{12}}{2}.$$

У дисковых обмоток можно принять

$$x_{12} = x_{13} = x_{23} = x_0,$$

поэтому

$$x_1 = x_2 = x_3 = \frac{x_0}{2}.$$

У цилиндрических обмоток с расположением катушек по рис. 98a

$$x_{12} = x_{23} = \frac{1}{2} x_{13},$$

а с расположением катушек по рис. 98b

$$x_{12} = x_{13} = \frac{1}{2} x_{23}.$$

Следовательно, для первого расположения катушек

$$x_1 = \frac{x_{13}}{2}; \quad x_2 = 0; \quad x_3 = \frac{x_{13}}{2};$$

для второго расположения катушек

$$x_1 = 0; \quad x_2 = \frac{x_{23}}{2}; \quad x_3 = \frac{x_{23}}{2}.$$

Зная реактивные сопротивления обмоток, нетрудно построить диаграмму электродвижущих сил и токов трехобмоточного трансформатора.

[1] Richter, El. Masch., B. III.

*

На рис. 99a изображены диаграммы ампервитков обмоток и диаграмма токов в предположении, что токи в обмотках *2* и *3* запаздывают по фазе относительно своих электродвижущих сил на углы φ_2 и φ_3.

В треугольнике токов векторы I'_2 и I'_3 изображают токи вторичных обмоток, приведенные к первичной обмотке. Как видно из рисунка, ампервитки первичной обмотки у данного трансформатора равны геометрической сумме ампервитков обеих вторичных обмоток.

На рис. 99b изображена диаграмма токов и напряжений для трехобмоточного трансформатора с дисковой обмоткой, у которого реактивные сопротивления обмоток

$$x_1 = x_2 = x_3 = \frac{x_0}{2}.$$

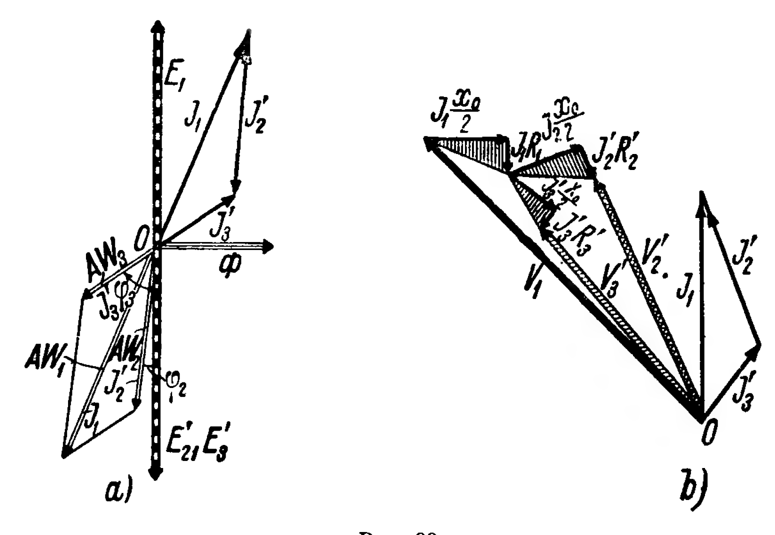


Рис. 99.

На рисунке 99b вектор тока первичной обмотки направлен по вертикали; треугольники падений напряжений имеют один катет, перпендикулярный вектору тока, а другой — параллельный тому же вектору тока.

На рис. 100a изображена диаграмма токов и напряжений для трансформатора с цилиндрическими обмотками с расположением по рис. 98a, т. е. имеющими реактивные сопротивления

$$x_1 = \frac{x_{13}}{2}, \quad x_2 = 0 \quad \text{и} \quad x_3 = \frac{x_{13}}{2}.$$

На рис. 100b изображена диаграмма токов и напряжений для трансформатора с цилиндрическими обмотками с расположением по рис. 98b, т. е. имеющими реактивные сопротивления

$$x_1 = 0, \quad x_2 = \frac{x_{23}}{2} \quad \text{и} \quad x_3 = \frac{x_{23}}{2}.$$

Из сравнения диаграмм рис. 100a и 100b видно, что изменение вторичных напряжений при цилиндрических обмотках с расположением по рис. 98b меньше, чем с расположением по рис. 98a.

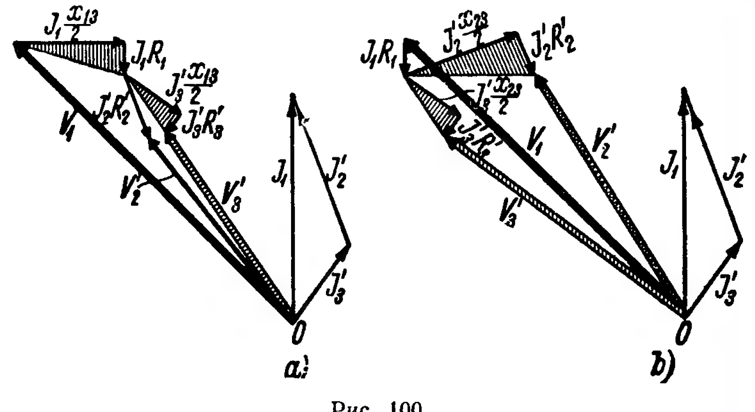


Рис. 100.

§ 45. Вопросы для самопроверки.

1. Что подразумевается под включением вторичных катушек зигзагом и с какой целью оно применяется?
2. Что такое трехобмоточный трансформатор?

Как изображаются векторные диаграммы трехобмоточного трансформатора?

ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ.

ПОТЕРИ И КОЭФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ТРАНСФОРМАТОРА.

§ 46. Потери энергии в трансформаторе.

Потери энергии в трансформаторе при нагрузке имеют место в железе его сердечника и в обмотках. Потери в железе, зависящие от величины магнитной индукции в нем, при нагрузке меньше, чем при холостой работе, на весьма незначительную величину, так как магнитный поток при нагрузке лишь немного меньше потока при холостой работе.

Обычно считают потери в железе трансформатора при нагрузке равными тем же потерям при холостой работе.

Теоретически потери в железе можно определить по формулам: потери от гистерезиса

$$P_г = \sigma_г \left(\frac{f}{100}\right) \left(\frac{B_m}{1000}\right)^{1,6} v_ж \text{ ватт;}$$

потери от токов Фуко

$$P_\phi = \sigma_\phi \left(d\,\frac{f}{100}\cdot\frac{B_m}{1000}\right)^2 v_ж \text{ ватт.}$$

В этих формулах: $v_ж$ — объем железа в кубических дециметрах; f — частота в герцах; B_m — наибольшее значение индукции в железе в гауссах; $\sigma_г$ — постоянная гистерезиса, которую для хороших сортов железа можно принять равной единице, а для железа, содержащего кремний, меньше единицы, именно 0,5—0,63; d — толщина листов железа в миллиметрах; σ_ϕ — постоянная, которая для обычных сортов железа находится в пределах 1,3—1,6, а для железа с кремнием — в пределах 0,4—0,5.

Так как магнитный поток трансформатора при неизменном напряжении у первичной обмотки остается почти постоянным при всех нагрузках, то потери от гистерезиса и токов Фуко можно считать практически постоянными, не зависящими от нагрузки и почти равными потерям холостой работы за вычетом потерь от тока холостой работы в первичной обмотке.

Необходимо отметить, что потери в железе зависят от формы кривой приложенного к первичной обмотке напряжения. Из выражения для электродвижущей силы при несинусоидальном потоке $E = 4fk_в w_1\Phi\cdot 10^{-8}$, где $k_в$ — коэфициент кривой электродвижущей силы, следует, что при неизменном значении электродвижущей силы произведение $k_в\Phi$ для кривых напряжений разной формы должно быть одно и то же. Так как для тупых кривых $k_в < 1{,}11$, а для острых $k_в > 1{,}11$, то, очевидно, при острых кривых напряжения поток может быть меньше, а следовательно будет меньше и индукция, которой пропорциональны потери в железе. Кривые, отличающиеся от синусоиды, считаются неприемлемыми из-за возможного резонанса в кабельных сетях от высших гармоник.

Практика обнаруживает, что иногда потери в железе трансформатора увеличиваются на 3—4% с течением времени вследствие появляющегося от непрерывного нагрева „старения" железа.

Кроме потерь в железе, поддающихся расчету, имеются так называемые „добавочные потери", которые равны разности между потерями холостого хода готового уже трансформатора и расчетными потерями. Одной из причин появления добавочных потерь служит неравномерное распределение индукции в железе. Например в местах стыков, выполненных внахлестку, наблюдается заметное увеличение индукции сравнительно с ее значением в сердечниках. Дыры для болтов также вызывают неравномерное распределение индукции. В наружных углах ярма индукция значительно меньше, чем в самом ярме. Она меньше в наружных частях сердечника, чем во внутренних у стержневого трансформатора. Повышение индукции влечет за собой увеличение потерь сравнительно с расчетными потерями.

Второй причиной увеличения потерь в железе является несовершенство изолировки листов железа друг от друга, а также плохая сборка железа. Последние причины могут в значительной мере повысить потери на токи Фуко.

В меди обмоток имеют место потери от рабочего тока в обмотках. Если R' — омическое сопротивление одной фазы обмотки, то потери в ней при прохождении постоянного тока будут $U_м = I^2R'$. Сопротивление R' можно определить по формуле

$$R' = \rho_0\,\frac{(1+\alpha T)\,l_m w}{q},$$

где ρ_0 — удельное сопротивление меди проводников, равное 0,00016 при 0° С; T — температура нагрева в градусах Цельсия; l_m — средняя длина витка обмотки в сантиметрах; w — число витков обмотки; q — сечение проводника в квадратных миллиметрах и α — температурный коэфициент меди, равный 0,0039.

Принимая во внимание, что $wl_mq = v_м\cdot 10^5$, где $v_м$ — объем меди в кубических дециметрах, и что $\frac{I}{q} = \Delta$ (плотность тока в амперах на 1 *мм*²), получаем для потерь в меди обмотки выражение

$$P_м = I^2R' = \rho_0(1+\alpha T)\,v_м\,\Delta^2\cdot 10^5.$$

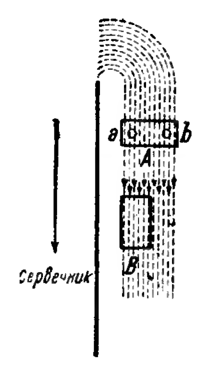


Рис. 101.

Действительные потери в меди обмоток трансформатора больше определяемых по последней формуле на величину добавочных потерь, вызываемых в обмотках полем рассеяния. На рис. 101 изображена примерная картина прохождения силовых линий поля рассеяния вне сердечника через проводник A, расположенный широкой стороной перпендикулярно силовым линиям.

Легко видеть, что волоконце a этого проводника сцепляется с большим количеством силовых линий, нежели волоконце b. Вследствие этого индуктивность волоконца a больше индуктивности волоконца b, и ток в сечении проводника с большей силой пойдет через волоконце b. Это значит, что плотность тока у наружных краев сечения проводника будет больше, нежели у внутренних. Последнее обстоятельство приводит к увеличению потерь в проводнике.

Увеличение потерь в проводниках, вызываемое полем рассеяния при переменном токе, учитывают обычно некоторым увеличением омического сопротивления R', полагая активное или эффективное сопротивление $R = kR'$, где k — коэфициент, находящийся в пределах 1,05 — 1,25 — в зависимости от более или менее удачного расположения проводников обмотки как по отношению друг к другу, так и по отношению к сердечнику трансформатора. Например, в проводнике B увеличение потерь меньше, нежели в проводнике A.

Выведем условия, при которых потери в меди и железе трансформатора наименьшие. Потери в меди обеих обмоток составляют

$$P_м = \rho_{01}(1+\alpha_1 T_1)\,v_{м1}\,\Delta_1^2\cdot 10^5 + \rho_{02}(1+\alpha_2 T_2)\,v_{м2}\,\Delta_2^2\cdot 10^5.$$

При одном и том же объеме меди обеих обмоток, т. е. при $v_{м1} = v_{м2} = \text{const}$, и при одинаковых величинах ρ_0, α и I, т. е. при одинаковом качестве меди и одинаковом нагреве обмоток, потери в меди пропорциональны сумме $v_{м1}\Delta_1^2 + v_{м2}\Delta_2^2$. Следовательно,

потери в меди будут наименьшими, когда, при $v_{м1}+v_{м2}=\text{const}$, сумма $v_{м1}\Delta_1^2+v_{м2}\Delta_2^2$ — minimum. Вводя в последнее выражение соотношения:

$$v_{м1}=w_1 q_1 l_{m1}\cdot 10^{-5};\quad v_{м2}=w_2 q_2 l_{m2} 10^{-5},$$

а также

$$\Delta_1 q_1 = I_1;\ \Delta_2 q_2 = I_2 \approx \frac{w_1}{w_2} I_1,$$

получаем, что наименьшие потери будут иметь место, когда $\Delta_1 l_{m1}+$ $+\Delta_2 l_{m2}$ — minimum при $\frac{l_{m1}}{\Delta_1}+\frac{l_{m2}}{\Delta_2}=\text{const}$. Путем диференцирования и подстановок можно получить из двух последних выражений следующее условие наименьших потерь в меди:

$$\Delta_1=\Delta_2,$$

т. е.

при данном объеме меди потери в ней будут наименьшими, если плотности тока в первичной и вторичной обмотках одинаковы.

При $\Delta_1=\Delta_2$ отношение потерь в меди первичной и вторичной обмоток будет

$$P_{м1}:P_{м2}=v_{м1}:v_{м2}=l_{m1}:l_{m2},$$

т. е. равно отношению средних их длин. Так как у дисковых обмоток $l_{m1}=l_{m2}$, то при равенстве плотностей тока потери в первичной и вторичной обмотках одинаковы.

Не следует упускать из виду, что выведенное условие наименьших потерь в меди относится только к потерям омическим. В меди же имеют место, как было указано, добавочные потери, которые также зависят от сечения проводников, т. е. в конечном результате от плотности тока. Поэтому в отношении общих активных потерь в меди полученное условие не совсем точно.

Потери на гистерезис и токи Фуко в железе трансформатора даются суммою

$$P_{ж}=k_1 B_m^{1,6} v_{ж}+k_2 B_m^2 v_{ж},$$

где k_1 и k_2 — постоянные. Следовательно эти потери пропорциональны произведению индукции в железе и объему сердечника.

Если бы индукция в отдельных частях сердечника была неодинакова, то

$$P_{ж}=k_1 B_{m1}^{1,6} v_{ж1}+k_1 B_{m2}^{1,6} v_{ж2}+k_2 B_{m1}^2 v_{ж1}+k_2 B_{m2}^2 v_{ж2}+\dots$$

Подобно тому, как это было сделано для омических потерь, можно было бы доказать, что

при одном и том же объеме железа, т. е. при $v_{ж1}+v_{ж2}=\text{const}$ потери иа гистерезис и токи Фуко будут наименьшими, если индукция во всех частях магнитной цепи трансформатора будет одна и та же, т. е. $B_{m1}=B_{m2}=\dots$

Значение потерь в железе и в меди трансформаторов см. извлечения из ОСТ 4815 в конце книги.

§ 47. Коэфициент полезного действия трансформатора.

По отношению к трансформаторам различают мгновенный и годовой или суточный коэфициент полезного действия. Первый представляет собою отношение вторичной мощности к первичной в данный момент, второй — отношение расходуемой вторичною цепью полезной энергии за год, за сутки или вообще за определенный промежуток времени к подведенной к первичной цепи энергии за тот же период времени, т. е.

$$\eta_{мгн}=\frac{\text{полезная мощность}}{\text{полезная мощность}+\text{потери в меди и железе}}$$

$$\eta_{год}=\frac{\text{годовая полезная энергия}}{\text{годовая полезная энергия}+\text{годовые потери в меди и железе}}.$$

Для однофазного трансформатора выражение для мгновенного коэфициента полезного действия будет

$$\eta_{мгн}=\frac{V_2 I_2\cos\varphi_2}{V_2 I_2\cos\varphi_2+I_2^2 R_k+P_{ж}}$$

и для трехфазного трансформатора

$$\eta_{мгн}=\frac{3\,V_2 I_2\cos\varphi_2}{3\,V_2 I_2\cos\varphi_2+3 I_2^2 R_k+P_{ж}}.$$

В этих выражениях V_2 и I_2 — фазные напряжения и ток вторичной цепи, $R_к$ — фазное сопротивление короткого замыкания и $P_{ж}$ — потери в железе сердечника. Сопротивление

$$R_к=R_1+R_2 u^2,$$

где R_1 и R_2 — сопротивление первичной и вторичной обмоток, u — коэфициент трансформации.

Если мы возьмем производную от тока I_2 первого выражения для коэфициента полезного действия и приравняем ее нулю, то сможем определить то условие, при котором коэфициент полезного действия имеет наибольшее значение. В самом деле, имеем

$$\frac{d\eta}{dI_2}=\frac{V_2 I_2\cos\varphi_2(V_2\cos\varphi_2+2I_2R_k)-V_2\cos\varphi_2 V_2 I_2\cos\varphi_2+I_2^2R_k+P_{ж}}{(V_2 I_2\cos\varphi_2+I_2^2 R_k+P_{ж})^2}=0.$$

Так как знаменатель не может равняться бесконечности, то первая производная будет равна нулю, когда числитель равен нулю. Приравняв числитель нулю, получим после перемножения и сокращения

$$I_2^2 R_к=P_{ж}.$$

Из последнего равенства следует, что

наибольший коэфициент полезного действия трансформатор имеет при такой нагрузке, при которой потери в меди равны потерям в железе.

У осветительных трансформаторов, у которых потери в железе должны быть невелики, ибо они работают круглые сутки при разных нагрузках, наибольший коэфициент полезного действия имеет место обычно при $\frac{2}{3}-\frac{3}{4}$ нормальной нагрузки. У силовых трансформаторов наибольший коэфициент полезного действия имеет место при нормальной нагрузке.

Коэфициент полезного действия трансформаторов находится в пределах 94—99% в зависимости от мощности.

Годовой коэфициент полезного действия в большой степени зависит от режима эксплоатации трансформатора.

Годовые потери в меди пропорциональны току нагрузки во второй степени и периоду времени, в течение которого трансформатор находится под нагрузкою. Потери же в железе почти не зависят от нагрузки и имеют место непрерывно в течение всего года, в предположении, что трансформатор не отключается от сети.

Если t_n — время, измеренное в часах, в течение которого трансформатор работает с вторичною нагрузкою P_{2n} и имеет потери в меди $P_м$, а потери в железе $P_ж$, то

$$\eta_{год} = \frac{\sum_1^n t_n P_{2n}}{\sum_1^n t_n P_{2n} + \sum_1^n t_n P_м + 365 \cdot 24 \cdot P_ж} 100\%;$$

здесь n — число периодов времени, в течение которых трансформатор находится под нагрузкою P_2, P_{23}, $P_{24} \ldots P_{2n}$. Чем короче периоды нагрузки, тем ниже годовой коэфициент полезного действия. В первые периоды эксплоатации сети годовой коэфициент полезного действия нередко достигает всего лишь 70—80%, а при неудачном выборе трансформаторов он может быть и ниже.

Значения коэфициентов полезного действия по ОСТ 4815 см. „Приложения" (в конце книги).

§ 48. Методы определения коэфициента полезного действия трансформатора.

При определении коэфициента полезного действия трансформатора исходят обычно из выражения

$$\eta = \frac{\text{полезная вторичная мощность}}{\text{полезная вторичная мощность} + \text{потери}},$$

т. е. сводят задачу к измерению только одних потерь. Было бы менее рационально определять коэфициент полезного действия, исходя из выражения

$$\eta = \frac{\text{полезная вторичная мощность}}{\text{полная первичная мощность}},$$

так как, во-первых, пришлось бы иметь источник тока и реостаты нагрузки, соответствующие полной мощности трансформатора, во-вторых, возможные при измерении мощности ошибки полностью входили бы в окончательный результат. Чем выше коэфициент полезного действия трансформатора, тем больше влияют на результат ошибки измерения. При определении коэфициента полезного действия по первому методу даже и относительно большие ошибки в измерении потерь не отзываются в столь значительной степени на конечном результате, так как сами потери составляют незначительную долю общей мощности трансформатора.

§ 49. Определение коэфициента полезного действия трансформатора по холостой работе и короткому замыканию.

При холостой работе трансформатора мощность, подводимая к первичной обмотке, расходуется на потери от гистерезиса и токов Фуко в железе, на потери в активном сопротивлении или на Джоулев эффект в первичной обмотке и на токи Фуко в меди обмоток от потока рассеяния. Измерив ваттметром эту мощность и вычтя мощность, идущую на Джоулев эффект в первичной обмотке, мы получим мощность, равную потерям в железе. Так как при неизменном напряжении в первичной обмотке магнитный поток трансформатора остается при разных нагрузках почти неизменным, то и потери в железе при разных режимах работы трансформатора остаются почти неизменными. Таким образом опыт холостой работы трансформатора дает возможность определить потери в железе, имеющие место и при нагрузке.

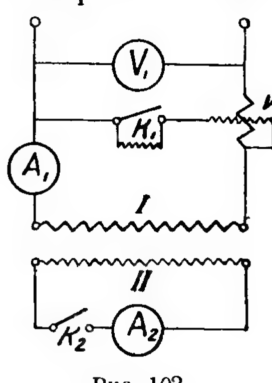


Рис. 102.

При коротком замыкании трансформатора подводимая к первичной обмотке мощность расходуется почти целиком на Джоулев эффект в обеих обмотках, так как потери в железе вследствие незначительного магнитного потока при коротком замыкании весьма малы (ими обыкновенно пренебрегают). Таким образом опыт короткого замыкания трансформатора дает возможность определить потери на Джоулев эффект в меди, т. е. потери от активных сопротивлений. Зная потери в железе и потери в меди при разных токах в обмотках, легко уже вычислить коэфициент полезного действия трансформатора при разных нагрузках.

На рис. 102 представлена схема приборов для опытов холостой работы и короткого замыкания трансформаторов с небольшим коэфициентом трансформации. При опыте холостой работы рубильники K_1 и K_2 разомкнуты; к первичной обмотке подведено нормальное напряжение V_1. Если W_0 — показание ваттметра, I_0 — показание амперметра и R_1 — сопротивление первичной обмотки, то потери в железе

$$P_ж = P_г + P_ф = W_0 - I_0^2 R_1.$$

При опыте короткого замыкания напряжение у первичной цепи

значительно понижается (почти до нуля), затем замыкаются рубильники K_1 и K_2. Регулируя напряжение у первичной цепи, можно установить в обмотках те или иные токи. Если W_κ — показание ваттметра (NB: переводный множитель другой!) и I_1 — показание амперметра, то

$$P_м = W_\kappa = I_1^2 R_\kappa ,$$

где R_κ — полное активное сопротивление обмоток трансформатора или активное сопротивление при коротком замыкании (равное $R_1 + u^2 R_2$), а $P_м$ — потери при коротком замыкании. У трансформаторов с большим коэфициентом трансформации накоротко замыкается обычно обмотка низшего напряжения.

Потери холостой работы и короткого замыкания желательно определять у нагретого до нормальной температуры трансформатора или же у охлажденного до температуры окружающего воздуха с пересчетом их на нормальную температуру нагрева (75°).

Коэфициент полезного действия при вторичном токе I_2, отвечающем первичному току I_1, будет

$$\eta = \frac{V_2 I_2 \cos\varphi_2}{V_2 I_2 \cos\varphi_2 + P_г + P_ф + P_м} : 100\%.$$

§ 50. Определение коэфициента полезного действия трансформатора по методу взаимной нагрузки.

Если имеются два совершенно одинаковых по мощности и типу трансформатора, то коэфициент полезного действия можно определить по методу взаимной нагрузки. Два одинаковых трансформатора T_1 и T_2 своими первичными обмотками приключаются параллельно к источнику тока, а вторичными обмотками включаются так, что их электродвижущие силы противоположны друг другу (рис. 103). Кроме того последовательно с первичною обмоткою трансформатора T_2 включается вторичная обмотка вспомогательного трансформатора $T_{всп}$, первичная обмотка которого соединяется также с источником тока. Последовательно с первичной обмоткой вспомогательного трансформатора включается реостат R с регулируемым, по возможности не реактивным, сопротивлением. Если замкнуть накоротко вторичную обмотку вспомогательного трансформатора рубильником K_2, то при включении рубильника K_1 и при открытых рубильниках K_2 и K_3 ваттметр измерит мощность, равную потерям при холостой работе в обоих трансформаторах, т. е.

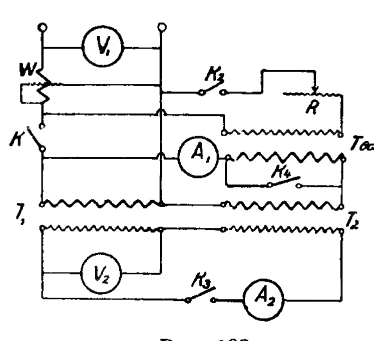


Рис. 103.

$$W' = P'_0 + P''_0.$$

Если же, разомкнув рубильник K_4, замкнуть рубильники K_2 и K_3 и реостатом R подобрать на зажимах первичной обмотки вспомо-

гательного трансформатора такое напряжение, при котором бы в первичных, а следовательно, и во вторичных обмотках испытуемых трансформаторов проходили нормальные токи I_1 и I_2, то ваттметр измерит мощность, расходуемую на полные потери в обоих испытуемых трансформаторах и на потери $P_в$ во вспомогательном трансформаторе и реостате R, т. е.

$$W'' = P' + P'' + P_в,$$

или

$$W'' = (P'_0 + P'_\kappa) + (P''_0 + P''_\kappa) + P_в,$$

причем вспомогательным трансформатором отдается испытуемым трансформаторам мощность, равная потерям в меди $P'_м + P''_м$.

Потери во вспомогательном трансформаторе и реостате $P_в$ определяются заранее особым опытом. Если принять, что испытуемые трансформаторы совершенно одинаковы, то общие потери в каждом из них будут

$$P = P' = P'' = \frac{W'' - P_в}{2}.$$

Регулируя сопротивление R, нетрудно найти потери при разных токах I_2 и соответственно I_1.

Выражение для коэфициента полезного действия в этом случае можно получить, исходя из следующих соображений. В рассматриваемой системе исследуемые трансформаторы работают друг на друга: энергия от вторичной обмотки одного трансформатора целиком передается вторичной обмотке другого трансформатора, первичная обмотка которого передает ее первичной обмотке первого. Если P_2 — мощность вторичных обмоток трансформаторов (для обеих обмоток она одинакова), то мощность, получаемая одним из трансформаторов, равна $P_2 + P$, а отдаваемая другим трансформатором равна $P_2 - P$. Таким образом коэфициент полезного действия системы будет

$$\eta_1 \eta_2 = \frac{P_2 - P}{P_2 + P} = \frac{P_2 - \dfrac{W'' - P_в}{2}}{P_2 + \dfrac{W'' - P_в}{2}},$$

где η_1 и η_2 — коэфициенты полезного действия трансформаторов.

Полагая их равными, имеем

$$\eta_1 = \eta_2 = \sqrt{\frac{P_2 - \dfrac{W'' - P_в}{2}}{P_2 - \dfrac{W'' - P_в}{2}}}.$$

При исследовании трансформаторов высокого напряжения часто неудобно включать во вторичную цепь ваттметр; в таком случае можно положить

$$P_2 \approx V_1 I_1.$$

§ 51. Разделение потерь в трансформаторе.

Потери в трансформаторе определяются, как было уже замечено, по опытам холостой работы и короткого замыкания. Опыт холостой работы дает потери на гистерезис и токи Фуко в железе трансформатора. Опыт короткого замыкания дает потери на Джоулев эффект в меди его обмоток. Так как потери в железе трансформатора при всех нагрузках почти постоянны, ибо магнитный поток трансформатора почти не зависит от нагрузки, то опыт холостой работы достаточно произвести при нормальном для трансформатора напряжении (т. е. при нормальном магнитном потоке). Схема для опыта холостой работы изображена на рис. 102. Измеряемая ваттметром мощность

$$W_0 = P_{ж} + I_0^2 R_1,$$

т. е. равна потерям в железе и незначительным потерям на Джоулев эффект от тока холостой работы. Таким образом потери в железе от гистерезиса и от токов Фуко в железе $P_{ж} = P_0 - I_0^2 R_1$. Для большей точности измерения как ваттметр, так и амперметр должны соответствовать относительно небольшой мощности и небольшому току холостой работы. При определении потерь в железе трехфазного трансформатора с симметричною магнитною цепью потери холостой работы можно измерять одним ваттметром, включенным в одну только фазу; показания ваттметра в этом случае следует утраивать. При несимметричной магнитной цепи трансформатора, вследствие неодинаковой индукции в отдельных его сердечниках, потери в железе необходимо определять, измеряя общую мощность двумя ваттметрами.

Для того чтобы иметь более детальное суждение о качестве железа трансформатора и вообще о его конструкции, желательно опытным путем отделить потери на гистерезис в нем от потерь на токи Фуко. Это нетрудно сделать, пользуясь методом, аналогичным тому, который применяется при разделении потерь на гистерезис и токи Фуко в железе машины переменного тока.

Потери на гистерезис и токи Фуко теоретически вычисляются по формулам, приведенным в главе шестой. Из этих формул следует, что при постоянной индукции в железе потери на гистерезис пропорциональны первой степени, а потери на токи Фуко — второй степени частоты тока, т. е.

$$P_г = af^2; \quad P_ф = bf^2,$$

где a и b — постоянные.

Следовательно, общие потери в железе будут

$$P + P_ф = af + bf^2;$$

одному периоду отвечают потери

$$\frac{P_г + P_ф}{f} = a + bf.$$

Если нанести по оси ординат значения $\frac{P_г + P_ф}{f}$ в функции частоты f, откладываемой по оси абсцисс, то получится прямая kl (рис. 104). Эта прямая отсечет на оси ординат отрезок $Ok = a$, эквивалентный потерям на гистерезис за один период, ибо при $f = 0$ потери на токи Фуко $P_ф = 0$. Горизонтальная линия kn, проведенная из точки k, делит ординаты прямой kl на отрезки, например cp и pg, эквивалентные потерям на гистерезис и токам Фуко за один период. Измерив эти отрезки в масштабе ординат и умножив на соответствующие числа периодов, легко получить потери на гистерезис и токи Фуко в отдельности для любой частоты.

При опытном получении прямой kl необходимо, меняя частоту, поддерживать постоянную индукцию в сердечнике трансформатора. Как показывает формула для электродвижущей силы трансформатора (которая при холостой работе почти равна напряжению на зажимах его)

$$E_1 = 4k_в f w_1 QB \cdot 10^{-8} = MfB,$$

где Q — сечение железа сердечника, B — индукция, M — постоянная, — индукция в сердечнике B будет оставаться постоянной, если с изменением частоты f будет пропорционально меняться и электродвижущая сила E_1. Практически это выполняется следующим образом. Дают специальному генератору, питающему трансформатор, нормальную скорость и возбуждают его так, чтобы на зажимах трансформатора было нормальное для него напряжение. Затем, оставляя возбуждение генератора неизменным, меняют его скорость вращения (шунтовым или пусковым сопротивлением, если генератор приводится во вращение электродвигателем). При этом напряжение генератора меняется почти пропорционально скорости или, другими словами, частоте питающего трансформатор переменного тока. Для каждой скорости вращения определяют W_0, I_0, V_1 и f.

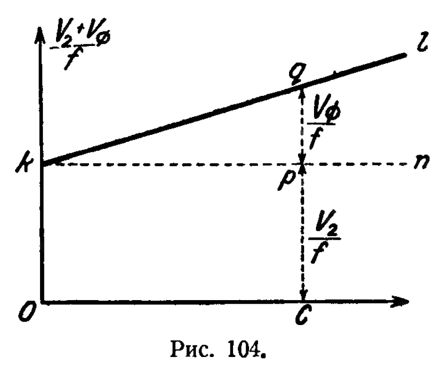


Рис. 104.

Для того, чтобы ориентироваться в величинах потерь в железе и меди трансформаторов, ниже приведена таблица 9, содержащая стандартные значения этих потерь, установленные Союзом германских электротехников для стандартных распределительных трансформаторов трехфазного тока в предположении, что они будут работать при вторичных напряжениях 231 и 400 V (стандартные напряжения в Германии) с обмотками, соединенными звезда-звезда (A), звезда-зигзаг-звезда (B) и при частоте 50 Hz.

§ 52. Вопросы для самопроверки.

1. Потери в железе трансформатора равны 312 W, из них 86 W от токов Фуко. Если построить тот же трансформатор из листов железа удвоенной толщины, каковы будут потери в железе при том же приложенном напряжении и при той же частоте его?

Мощность трансформатора kVA	Потери в железе в ваттах				Потери в меди в процентах от нормальной мощности при всех указанных напряжениях	
	5 000 V	10 000 V	15 000 V	20 000 V	A	B
5	60	70	85	100	3,2	3,5
10	100	115	130	150	2,9	3,2
20	175	190	210	225	2,7	3,0
30	240	280	280	300	2,5	2,8
50	350	375	400	425	2,4	2,6
75	475	510	540	5[illegible]5	2,2	2,4
100	600	730	660	700	2,0	2,2

2. При напряжении 110 V с частотою 50 Hz потери в железе трансформатора равны 250 W; из них 25% от токов Фуко. Каковы будут потери в железе трансформатора при напряжении 220 V с частотою 50 Hz? Каковы будут потери в железе при напряжении 110 V с частотою 25 Hz?

3. Чему равен коэфициент полезного действия трансформатора 5000 kVA; $V_1 : V_2 = 52\,000 : 33\,000$ V, $f = 50$ Hz при нормальной активной нагрузке, если известны данные опыта холостой работы: мощность холостой работы в ваттах $P_0 = 17\,500$ и мощность холостой работы в вольтамперах $VA = 146\,000$, а также данные короткого замыкания: $I_{1к} = 151{,}5$ A (нормальный ток), $V_{1к} = 1800$ V и $P_{1к} = 27\,000$ W?

4. Осветительный трансформатор мощностью 10 kVA берет 122 W при холостой работе и 178 W при коротком замыкании с нормальными токами в обмотках. Этот трансформатор включен в сеть на непрерывное действие, причем в течение 6 часов в сутки он работает с полною нагрузкою, а в течение остальных 8 часов работает вхолостую. Чему равен его суточный коэфициент полезного действия?

5. Трансформатор, работая вхолостую при напряжении 460 V, забирает ток 0,94 A и мощность 122 W. Имеется второй трансформатор, подобный первому во всем, за исключением того, что первичная обмотка имеет вдвое больше витков, а поперечное сечение магнитной цепи его вдвое меньше. Каковы ток и мощность этого трансформатора, если к его первичной обмотке приложено напряжение 230 V?

6. Имеется трансформатор 25 kVA; $V_1 : V_2 = 22\,000 : 440$ V, $f = 50$ Hz и следующие данные опытов холостой работы и короткого замыкания: a) опыт холостой работы: VA (вольтамперы) $= 1700$, $P_0 = 440$ W; b) опыт короткого замыкания: $V_{1к} = 1020$ V, $I_{1к} = 1{,}136$ A, $P_{1к} = 351$ W. Определить степень регулирования и коэфициент полезного действия трансформатора для нагрузки 22 kW при коэфициенте мощности $\cos \varphi_2 = 0{,}85$ и при нормальном напряжении. Построить внешнюю характеристику при $\cos \varphi_2 = 0{,}85$.

7. Начертить диаграммы трансформатора, описанного в пп. 1 и 2 § 38.

ГЛАВА ДВЕНАДЦАТАЯ.

ТРАНСФОРМИРОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА ТРЕМЯ ОДНОФАЗНЫМИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ.

При трансформировании трехфазного тока можно пользоваться или тремя отдельными совершенно одинаковыми однофазными трансформаторами, или же одним трехфазным трансформатором. Какому из двух способов трансформирования отдать предпочтение — зависит от условий работы трансформаторов.

При трансформировании трехфазного тока тремя однофазными трансформаторами первичные и вторичные обмотки их соединяются между собою или звездою, или же треугольником. В то время как первичные обмотки отдельных трансформаторов, имеющих независимые друг от друга магнитные цепи, могут быть соединены звездою или треугольником любыми концами, вторичные обмотки тех же трансформаторов, раз первичные обмотки уже находятся под напряжением, должны быть соединены вполне определенным способом, указываемым потенциальною диаграммою для вторичной системы.

§ 53. Потенциалы концов первичной и вторичной обмоток однофазного трансформатора.

Прежде чем переходить к выяснению вопроса о порядке соединения вторичных обмоток, необходимо уяснить себе влияние на-

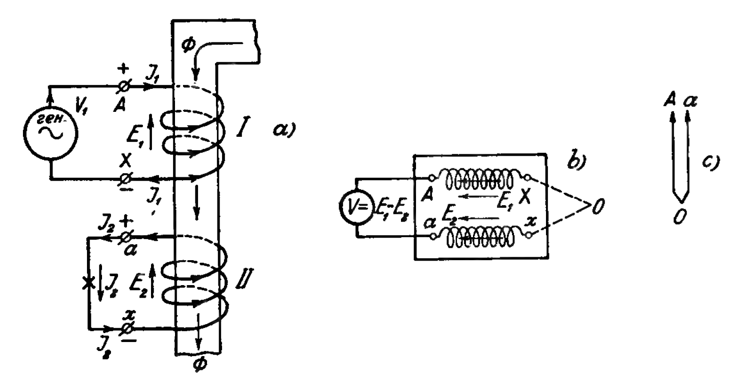


Рис. 105.

правления намотки вторичной обмотки однофазного трансформатора на потенциалы концов ее. Предположим, что первичная и вторичная обмотки намотаны на стержень в одном направлении, например по часовой стрелке, если смотреть на обмотки сверху (рис. 105 a). В таком случае магнитный поток Ф индуктирует электродвижущие силы, направленные в обеих обмотках или сверху вниз, или же снизу вверх, смотря по тому, как направлен поток, и убывает ли он или возрастает. Это значит, что верхние концы обмоток, например A и a, или нижние X и x имеют один и тот же

по знаку потенциал — положительный или отрицательный. Если бы, например, под действием напряжения генератора V в данный момент ток в первичной обмотке шел от зажима A к зажиму X и нарастал, то магнитный поток Ф, создаваемый обмоткой, был бы направлен вниз и индуктировал бы в ней первичную электродвижущую силу E_1, направленную вверх от зажима X к зажиму A (ибо направление ее таково, что она может создать ток, поддерживающий прежнее состояние магнитного потока, т. е. направленный вверх). Легко видеть, что первичная электродвижущая сила прямо противоположна приложенному к первичной обмотке напряжению V_1. Следовательно, первичная обмотка трансформатора действует совершенно так же, как и якорь двигателя, который создает при вращении электродвижущую силу, направленную против напряжения, т. е. противоэлектродвижущую силу. Потенциал зажима A первичной обмотки в рассматриваемый момент — положительный, а потенциал зажима X—отрицательный. Тот же магнитный поток во вторичной обмотке индуктирует электродвижущую силу E_2, направленную, как и первичная, вверх от зажима x к зажиму a. Эта электродвижущая сила (подобная электродвижущей силе генератора) дает ток I_2, направленный во внешней цепи от зажима a к зажиму x. Следовательно зажим a будет иметь положительный потенциал, а зажим x — отрицательный. Таким образом в рассматриваемый момент оба верхние зажимы A и a обмоток—положительные, а нижние X и x — отрицательные. Рассмотрев другие моменты, мы убедимся, что как верхние зажимы, так и нижние имеют неизменно одинаковый по знаку потенциал.

Концы обмоток выводятся обычно на верхнюю крышку трансформатора, как указано на рис. 105 b, т. е. верхние концы A и a располагаются с одной стороны, например слева, а нижние X и x — справа. Если бы в рассматриваемом случае односторонней намотки первичной и вторичной обмоток соединить, например, правые концы между собою, то включенный между левыми зажимами вольтметр дал бы разность напряжений или показал бы нуль, если бы числа витков обмоток были равны друг другу. В последнем случае потенциалы обоих концов в топографическом изображении представились бы одною точкою A или a, находящеюся на расстоянии $E_1 = E_2$ от точки O, потенциал которой считается равным нулю (рис. 105 с).

Если бы первичная и вторичная обмотки трансформатора были намотаны в противоположные стороны (рис. 106), то магнитный поток Ф индуктировал бы в них электродвижущие силы, направленные в разные стороны — одну E_1, действующую в данный момент вверх, и другую E_2, действующую в тот же момент времени вниз. Легко видеть из рис. 106 а, что верхние зажимы A и a будут иметь разные по знаку потенциалы, точно так же разные потенциалы будут иметь и нижние зажимы обмоток X и x. На крышке трансформатора с разностороннею намоткою первичной и вторичной обмоток (рис. 106 b) левые зажимы и правые зажимы имеют взаимно противоположные потенциалы, благодаря чему вольтметр, приключенный к левым зажимам A и a, при соединении между собою правых зажимов X и x даст сумму напряжений обмоток. В топографическом изображении потенциалы зажимов A и a изобразятся точками A и a, расположенными в прямо противоположных направлениях по отношению к точке O, потенциал которой приравнен нулю (рис. 106 с).

Согласно принятым в СССР нормам намотка первичных и вторичных обмоток должна быть односторонней и именно по часовой стрелке, считая от начала *A* или начала *a* к концу *X* или концу *x*.

Американские нормы рекомендуют для всех измерительных и силовых трансформаторов разностороннюю намотку и для всех распределительных трансформаторов (ниже 7500 V любой мощности, или ниже 200 kVA независимо от напряжения) одностороннюю намотку первичных и вторичных обмоток.

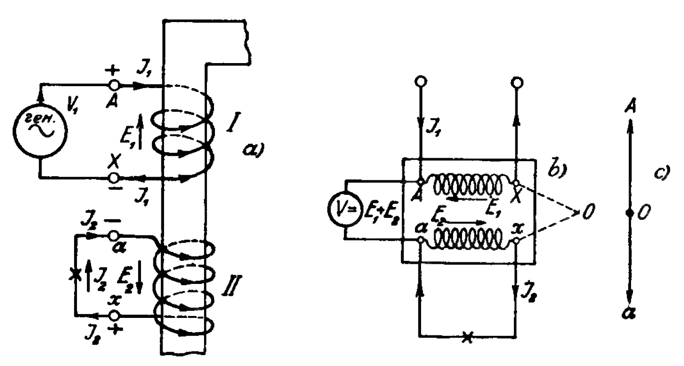


Рис. 106.

Односторонняя намотка обмоток имеет то преимущество, что при случайном соединении первичных и вторичных обмоток напряжение на концах обмоток ниже номинального высшего напряжения. Следует отметить, что если направление намотки влияет на взаимные направления электродвижущих сил первичных и вторичных обмоток, то на их фазу по отношению к магнитному потоку направление обмоток не оказывает влияния. По фазе и первичная и вторичная электродвижущие силы всегда отстают от магнитного потока на четверть периода.

§ 54. Порядок соединения обмоток трех однофазных трансформаторов.

А. Первичная и вторичная обмотки соединяются звездою. Пусть AX, BY и CZ — первичные обмотки и ax, by и cz — вторичные обмотки трех однофазных трансформаторов (рис. 107), причем первичные и вторичные обмотки каждого трансформатора навиты на сердечники в одном направлении, например по часовой стрел-

ке. Следовательно, если электродвижущая сила в первичной обмотке в данный момент направлена от нижнего конца X к верхнему началу A, т. е. нижний конец по отношению к внешней цепи имеет отрицательный потенциал, а верхний — положительный, то в тот же момент времени во вторичной обмотке электродвижущая сила направлена также от нижнего конца x к верхнему началу a, т. е. нижний конец имеет отрицательный потенциал, а верхний — положительный. Если связать между собою у первичных обмоток концы X, Y и Z, а свободные начала A, B и C присоединить к зажимам генератора, то последние получат потенциалы генератора. Эти потенциалы, согласно топографическому изображению их, можно представить тремя точками A, B и C, находящимися на угловом расстоянии 120°, а наибольшие значения электродвижущих сил обмоток — тремя векторами OA, OB и OC, взаимно сдвинутыми на 120° (рис. 107 a). Последняя диаграмма называется потенциальною; она говорит нам, что наибольшие потенциалы концов обмоток A, B и C, например, положительные, следуют друг за другом со сдвигом во времени на $^1/_3$ периода (или на 120°).

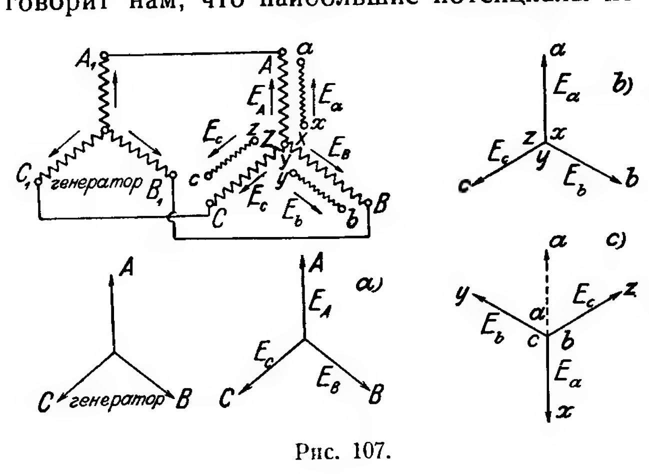


Рис. 107.

Но если первичные обмотки можно соединить любыми концами, и это соединение уже сделано, то для получения со стороны вторичной цепи симметричной трехфазной системы необходимо концы вторичных обмоток соединить между собою так, чтобы потенциалы свободных концов в топографическом изображении находились на взаимном угловом расстоянии в 120°, т. е. чтобы вторичные электродвижущие силы в векториальном изображении дали симметричную звезду. Так, при соединении между собою в нейтраль концов первичных обмоток X, Y и Z вторичные обмотки должны быть соединены или концами x, y и z или началами a, b и c. В первом случае потенциалы на свободных началах a, b и c взаимно расположатся совершенно так же, как и потенциалы начал A, B и C первичной обмотки (рис. 107 b), ибо на началах A и a, B и b, C и c потенциалы имеют наибольшие положительные значения в один и тот же момент времени. Во втором случае потенциалы свободных концов x, y и z в топографическом изображении займут прямо противоположные положения (рис. 107 c), так как в те моменты, когда на началах первичной обмотки A, B и C имеются наибольшие положительные потенциалы, на концах вторичной обмотки x, y и z будут соответственно наибольшие отрицательные потенциалы. Звезда вторичных электродвижущих сил в последнем

случае повернется относительно звезды электродвижущих сил первой комбинации на 180°.

Если бы вторичные обмотки были соединены ошибочно началами b, c и концом x, то получилась бы несимметричная система, так как спустя $^1/_3$ периода (или 120°) после того как на конце z был наибольший положительный потенциал, на начале a будет наибольший потенциал не положительный, а отрицательный. Другими словами, вектор электродвижущей силы фазы A повернется на 180° и вместе с двумя другими не даст правильной звезды, а даст веер из трех лучей, находящихся под углом в 60° (рис. 107 c). Напряжения в этом случае между свободными концами не будут равны друг другу: между концами y и z напряжение в $\sqrt{3}$ раз больше фазного напряжения, а между концами y и a или z и a оно равно фазному напряжению.

B. Первичные обмотки соединяются треугольником, вторичные — звездою. Как и в первом случае, первичные обмотки трех транс-

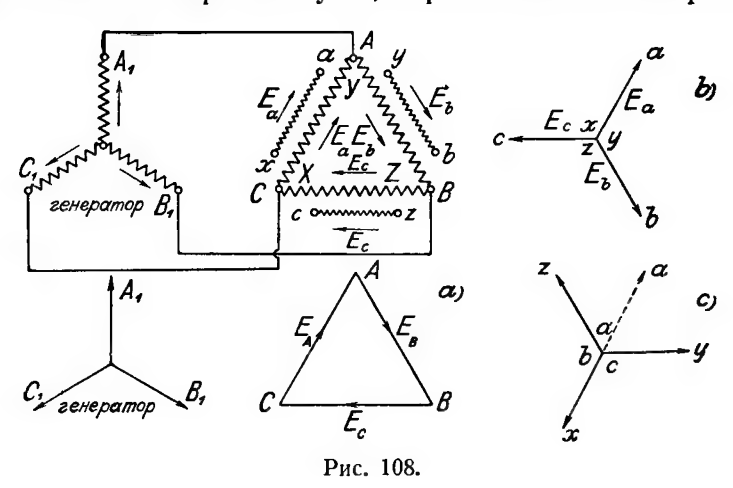


Рис. 108.

форматоров соединяются в треугольник любыми концами, так как направления электродвижущих сил в отдельных обмотках (или потенциалы концов) задаются источником тока, т. е. генератором. Вторичные же обмотки должны быть соединены между собою так, чтобы амплитуды индуктирующихся в этих обмотках электродвижущих сил были взаимно сдвинуты на 120°, другими словами, чтобы свободные концы имели наибольшие потенциалы, например положительные, следующие во времени друг за другом через $^1/_3$ периода. Если первичные обмотки соединить так, как указано на рис. 108 a, т. е. началами и концами $A — Y$, $B — Z$ и $C — X$, то вторичные обмотки должны быть связаны в общую точку (нейтраль) или концами x, y и z (рис. 108 b) или началами a, b и c (рис. 108 c). В самом деле, под действием напряжений генератора, сдвинутых по фазе на $^1/_3$ периода (120°), в первичных, а следовательно, и во вторичных обмотках появятся три электродвижущие силы, сдвинутые по фазе также на $^1/_3$ периода. Три электродвижущие силы вторичных обмоток при соединении трех их концов между собою

на свободных концах должны дать такие потенциалы, чтобы разности между этими потенциалами, или линейные напряжения, были одинаковы; другими словами, чтобы потенциалы свободных концов в топографическом изображении находились на взаимном угловом расстоянии в 120°. Нетрудно видеть из рис. 108, что это может быть только при указанных выше соединениях концов вторичных обмоток, ибо наибольшие потенциалы одного знака, например положительные, следуют друг за другом строго через $^1/_3$ периода или на началах, или на концах (рис. 108 b). Соединив у двух обмоток начала *b* и *c* и у третьей конец *x*, мы получили бы не звезду, а веер из трех лучей, находящихся под углом 60° (см. рис. 108 c).

C. Первичные и вторичные обмотки соединяются треугольником. Первичные обмотки соединяются треугольником, как и во втором случае, любыми концами. Вторичные обмотки необходимо связать между собою попарно так, чтобы электродвижущие силы их в векториальном изображении дали замкнутый треугольник. Только в этом случае сумма мгновенных значений всех трех электродвижущих сил в каждый момент времени будет равна нулю, и в замкнутом контуре из трех обмоток не получится уравнительного тока, другими словами, не получится короткого замыкания. Если, например, первичные обмотки соединить так, как указано на рис. 109 а, то вторичные обмотки должны быть соединены или началами или концами *ay, bz* и *cx* или началами, или концами *az, bx* и *cy*. В первом случае электродвижущие силы обмоток дадут векторный треугольник с движением векторов по часовой стрелке (рис. 109 b), во втором случае электродвижущие силы обмоток дадут треугольник с движением векторов против часовой стрелки (рис. 109 c). Если бы вторичные обмотки были соединены началами и концами *bx* и *yc*, то между оставшимися свободными началами *a* и *c* получилось бы напряжение, равное удвоенной электродвижущей силе одной обмотки, и потому металлически связать их было бы невозможно (рис. 109 c).

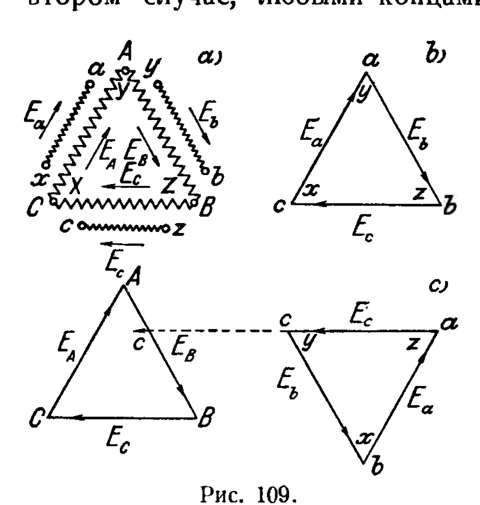


Рис. 109.

D. Первичные обмотки соединяются звездой, вторичные — треугольником. Первичные обмотки соединяются звездою любыми концами. У вторичных же обмоток должны быть связаны попарно концы, имеющие наибольшие потенциалы через $^1/_3$ периода (рис. 110).

На практике при первом соединении трех однофазных трансформаторов и при отсутствии обозначений концов поступают следующим образом. Соединяют первичные обмотки звездою или треугольником, как предписывает схема устройства, и подключают их к трехфазной сети. Если требуется соединить вторичные обмотки звездою, то связывают между собою в нулевую точку два любых конца двух обмоток и вольтметром измеряют напряжение у двух других концов тех же обмоток. При правильном соединении вольтметр укажет напряжение, в $\sqrt{3}$ раз превышающее фазное напряжение, т. е. напряжение одной обмотки. При неправильном соединении вольтметр покажет напряжение, равное фазному напряжению; в таком случае следует одну обмотку переключить, т. е. подвести к нулевой точке другой ее конец. Далее, присоединив к нулевой точке какой-либо конец третьей вторичной обмотки, измеряют вольтметром напряжение между свободным ее концом и свободными концами других обмоток. Если эти напряжения в $\sqrt{3}$ раз больше фазного напряжения, т. е. напряжения каждой обмотки, то соединение сделано правильно, если же измеренные напряжения будут равны фазному, то соединение сделано неправильно, и к общей точке следует подвести другой конец третьей обмотки, освободив первый.

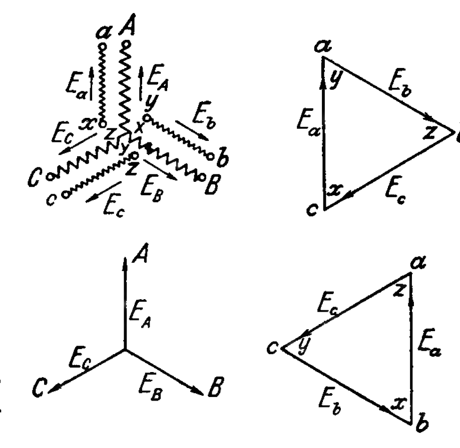


Рис. 110.

В том случае, когда вторичные обмотки собираются треугольником, поступают аналогично предыдущему. Соединяют между собою два каких-либо конца обмоток и вольтметром измеряют напряжение между оставшимися свободными их концами. При удачном выборе концов это напряжение будет равно фазному напряжению; при неудачном выборе концов оно в $\sqrt{3}$ раз больше фазного напряжения, и у одной обмотки следует переменить концы. Подключив затем к одному из свободных концов соединенных уже между собою обмоток какой-либо конец третьей обмотки, измеряют вольтметром напряжение между оставшимися еще несоединенными концами. Если конец третьей обмотки выбран удачно, то напряжение между свободными концами будет равно нулю, — их можно соединить, очевидно, металлически. Но если конец третьей обмотки взят неудачно, то напряжение между свободными концами будет в два раза больше фазного (рис. 109 c), и к первым обмоткам следует присоединить другой конец той же обмотки.

Здесь уместно заметить, что вследствие наличия третьих гармонических электродвижущих сил и при правильном присоединении третьей вторичной обмотки вольтметр иногда показывает некоторое (меньшее, однако, двойного фазного) напряжение между оставшимися несоединенными концами. В таком случае следует соединить эти концы между собою через некоторое подходящее сопротивление и амперметр. Если напряжение, показываемое вольтмет-

ром, действительно происходит от высших гармоник, то амперметр даст ничтожное отклонение, ибо для напряжения высокой частоты обмотки представляют очень большое сопротивление, следовательно, концы обмоток можно соединить непосредственно металлически. Если же это напряжение явилось результатом несимметрии обмоток, то амперметр может показать сильный уравнительный ток, и соединять концов металлически не следует.

При трансформаторах высокого напряжения операция отыскания подлежащих соединению концов вторичных обмоток должна протекать при значительно пониженном первичном напряжении.

Вместо вольтметра можно иногда воспользоваться подходящею лампочкою накаливания, обнаруживая несимметрию вторичной системы по неодинаковой яркости ее горения.

Для облегчения выполнения практических установок рекомендуется заводам первичную и вторичную обмотки, насаженные на один сердечник, наматывать в одном и том же направлении и обозначать наружные зажимы соответствующими буквами. Нижеследующая табличка дает принятые обозначения зажимов в разных странах.

	Высшее напряжение	Низшее напряжение
СССР	$A - X$	$a - x$
Франция	$A - B$	$a - b$
Германия	$U - V$	$u - v$
Америка	$H_1 - H_2$	$x_1 - x_2$

Нормы, принятые в СССР, рекомендуют наматывать обмотки по направлению часовой стрелки от зажима A к зажиму X и от зажима a к зажиму x. Согласно этим нормам практическая схема однофазного трансформатора должна изобразиться, как показано на рис. 111, в предположении, что трансформатор стержневой и на каждом стержне имеется по одной катушке высшего и низшего напряжения. Сплошные линии зигзагов изображают стороны витков, обращенные к зрителю. Пунктирные линии изображают стороны витков, закрытые сердечниками; сердечники вертикальны. На крышке имеются обозначения зажимов обмоток $A - X$ и $a - x$. Легко убедиться в том, что при принятом способе намотки обмоток и обозначениях зажимов зажимы A и a и соответственно зажимы X и x всегда однополярны, т. е. в каждый момент времени имеет место $\pm A$ $\pm a$ и соответственно $\mp X \mp x$.

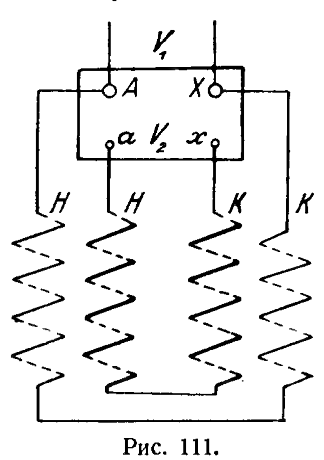


Рис. 111.

При наличии правильных обозначений концов обмоток выполнение соединений однофазных трансформаторов в трехфазные системы значительно облегчается.

§ 55. Вопросы для самопроверки.

1. Как рекомендуется наматывать первичные и вторичные обмотки одного и того же стержня?
2. Какого правила нужно придерживаться, соединяя обмотки трех однофазных трансформаторов для получения трефхазной системы: a) звезда — звезда, b) треугольник — треугольник?
3. Как изобразятся потенциальные диаграммы систем: a) треугольник — звезда, b) звезда — треугольник?

Что нужно сделать, чтобы в системе звезда — звезда вторичная звезда получилась повернутой на 180°?

ГЛАВА ТРИНАДЦАТАЯ.

ТРЕХФАЗНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ.

§ 56. Магнитная цепь.

В отношении конструкции магнитной цепи трехфазные трансформаторы распадаются, как мы видели ранее, на две группы: на стержневые и броневые. Стержневые трансформаторы подразделяются, в свою очередь, на трансформаторы с симметричною и несимметричною магнитною цепью. У первых трансформаторов (рис. 6) магнитное сопротивление для потоков всех фаз одно и то же, так как пути прохождения этих потоков одинаковы. У вторых трансформаторов (рис. 112) магнитное сопротивление для потока средней фазы (т. е. фазы, размещенной на среднем стержне) меньше, нежели для потоков крайних фаз. В самом деле, потоки крайних фаз проходят по более длинным путям и кроме того в ближайших частях ярма на рис. 112 в сечениях ab и cd потоки проходят полностью, насыщая железо в большей степени, нежели поток средней фазы. Следствием неравенства магнитных сопротивлений для потоков разных фаз является неравенство намагничивающих токов (токов холостой работы) в отдельных фазах при одном и том же фазном напряжении (см. § 58).

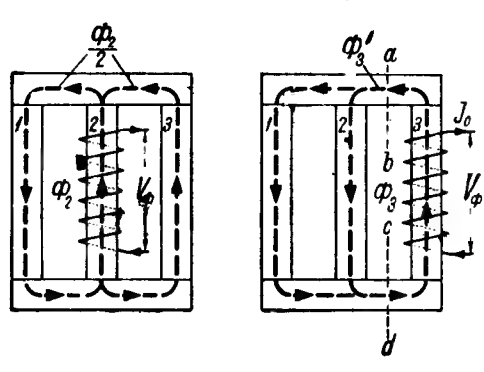


Рис. 112.

Броневой трансформатор трехфазного тока можно рассматривать как бы состоящим из трех однофазных трансформаторов, приставленных один к другому своими ярмами. На рис. 113 изображен броневой трансформатор с вертикально расположенными сердечниками; плоскостями CD он может быть разбит на три однофазных трансформатора. Магнитные потоки трех фаз проходят по железу так, как указано стрелками: в средних стержнях проходит пол-

ный магнитный поток одной фазы Ф, в верхнем и нижнем ярмах проходит поток вдвое меньший, т. е. $\frac{\Phi}{2}$, а потому сечение их при одной и той же индукции должно быть вдвое меньше, чем сечение стержней. Что касается магнитного потока в частях $\alpha - \beta$, то его

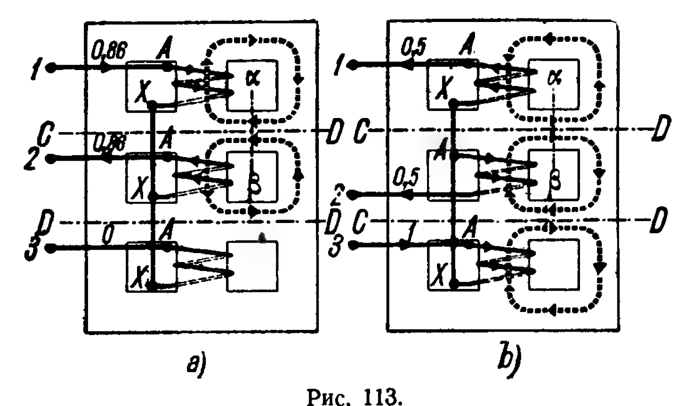


Рис. 113.

величина зависит от того, как будет включена фаза среднего стержня.

Предположим, что первичные обмотки всех фаз намотаны в одну сторону (на рис. 113a против часовой стрелки) и соединены звездою, причем в нейтраль соединены все концы. В таком случае наибольший поток в сечении $\alpha - \beta$ проходит в момент, когда в фазах *1* и *2* будут токи, равные $\frac{\sqrt{3}}{2} = 0{,}86$ наибольшего тока. В самом

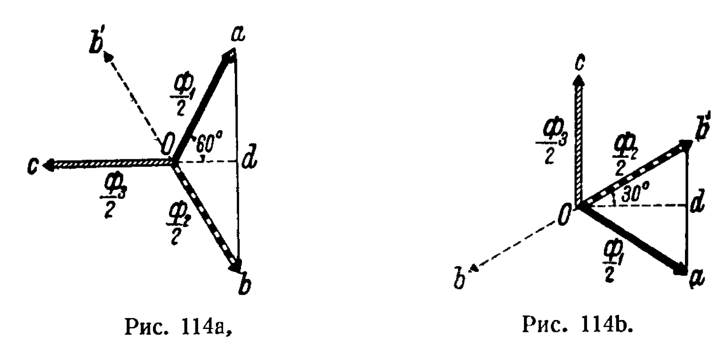


Рис. 114a, Рис. 114b.

деле, в рассматриваемый момент через сечение $\alpha - \beta$ будут проходить (рис. 114a) потоки

$$\frac{\Phi_m}{2} \sin 60 = \overline{ad} = \overline{bd}.$$

Так как они складываются, ибо направления токов в фазах *1* и *2* взаимно противоположны, то общий поток в сечении $\alpha - \beta$ будет

$$\overline{ab} = 2\frac{\Phi_m}{2} \sin 60 = \frac{\Phi_m}{2} \sqrt{3}.$$

Следовательно, при одинаковой индукции сечение части $\alpha - \beta$ должно быть в $\frac{\sqrt{3}}{2}$ меньше, чем сечение среднего стержня.

Предположим теперь, что средняя фаза вывернута, г. е. к нейтрали подведено начало *A*, а не конец *X*. В таком случае наибольший поток в сечении $\alpha - \beta$ будет иметь место в тот момент, когда в фазе *3* ток наибольший, а в фазах *1* и *2* токи равны $^1/_2$ наибольшего. В самом деле, в рассматриваемый момент через сечение $\alpha - \beta$ проходят потоки (рис. 114b).

$$\frac{\Phi_m}{2} \sin 30 = \overline{b'd} = \overline{ad},$$

причем потоки обеих фаз складываются. Общий поток в сечении $\alpha - \beta$ будет

$$2\frac{\Phi_m}{2} \sin 30 = \overline{b'a} = \frac{\Phi_m}{2}.$$

Следовательно, при одинаковой индукции сечение этой части должно быть равно половине сечения среднего стержня, т. е. меньше, чем при первом включении средней фазы.

Броневые трансформаторы широко распространены в Америке и мало распространены в Европе.

§ 57. Обмотки.

Обмотки отдельных фаз трехфазного трансформатора, как первичные, так и вторичные, могут быть соединены между собою обе треугольником или звездой, или же одна — треугольником, другая—звездой. В первом случае получаются трансформаторы с одинаковым соединением обмоток, во втором — со смешанным соединением.

Первичные обмотки броневого трансформатора с самостоятельными магнитными цепями для потоков всех трех фаз могут быть соединены между собою, как и при трех отдельных однофазных трансформаторах, любыми концами. Первичные обмотки стержневого трансформатора с общею магнитною цепью для всех фаз не могут быть соединены между собою звездою или треугольником любыми концами.

Они должны быть соединены друг с другом так, чтобы в каждый момент времени магнитный поток одного сердечника был равен и прямо противоположен по направлению сумме потоков двух других сердечников, другими словами, чтобы сумма мгновенных значений потоков всех сердечников, взятых со знаком плюс, когда поток направлен, например, вверх по стержню, и со знаком минус, когда поток имеет обратное направление, равнялась нулю.

Если бы обмотки всех фаз были намотаны в одном направлении, например по часовой стрелке, то для выполнения последнего условия при соединении обмоток звездой необходимо связать или все концы X, Y и Z (рис. 115a), или все начала A, B и C. При соединении треугольником необходимо связать начало одной обмотки с концом другой и т. д. Нетрудно убедиться в том, что при таком соединении обмоток магнитные потоки будут складываться правильно. В самом деле, пусть обмотки соединены звездой, причем к нейтрали подведены все концы. Возьмем момент, когда ток в одной обмотке (на рис. 115а — в обмотке 2) имеет наибольшее значение I_m, а в двух других, следовательно, будет $\frac{I_m}{2}$. При указанном на рис. 115а направлении хода витков магнитный поток средней фазы, будучи направлен в среднем стержне по линии вверх, имеет направление в крайних стержнях вниз. В то же время потоки крайних фаз будут направлены в крайних сердечниках также вниз. Следовательно, крайние фазы содействуют прохождению потока средней фазы, и сумма потоков крайних сердечников равна потоку среднего сердечника. То же будет и в другие моменты времени.

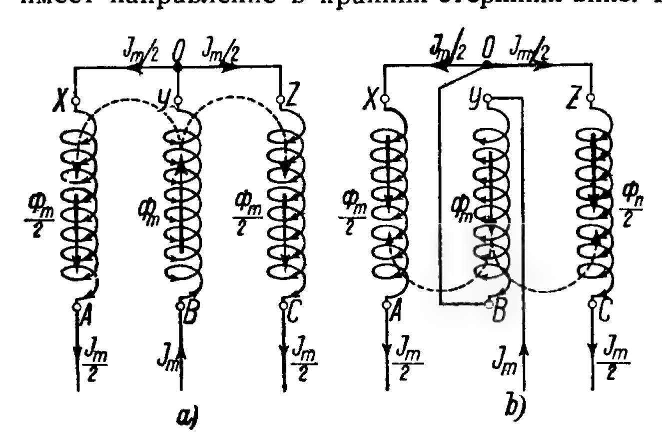


Рис. 115.

Если бы к общей точке, т. е. к нейтрали, мы подвели не верхний конец Y средней обмотки, а нижнее начало B, то направление потока в среднем стержне при том же направлении тока (снизу вверх на рис. 115b) было бы обратное по отношению к потокам крайних стержней. В результате произошло бы размагничивание трансформатора и увеличение силы намагничивающего тока.

В том случае, когда выведенные концы обмоток не имеют надлежащих обозначений, рекомендуется первое подключение первичной обмотки к сети производить через легкие предохранители, выдерживающие нормальный ток холостой работы трансформатора (т. е. 4—5% от нормального нагрузочного тока).

Вторичные обмотки соединяются между собою совершенно так же, как и при трансформировании тремя однофазными трансформаторами, т. е. так, чтобы они давали симметричную трехфазную систему. Следует заметить, что трехфазные трансформаторы строятся обычно для какого-либо определенного соединения первичных и вторичных обмоток, и потому работа их при другом соединении будет протекать ненормально. Если, например, у трансформатора, нормально работающего с первичной обмоткою, соединенною звездой, переключить эту обмотку на треугольник, то при неизменном напряжении сети магнитный поток каждой фазы увеличится в $\sqrt{3}$ раза, так как к фазам будет подведено напряжение не $\frac{V_л}{\sqrt{3}}$, а $V_л$, если $V_л$ — линейное напряжение. При таком значительном увеличении потока заметно повысится сопротивление магнитной цепи (вследствие увеличения ее насыщенности) и возрастет сила намагничивающего тока. С потоком возрастут также потери на гистерезис и на токи Фуко, вследствие чего железо сердечника быстро нагреется. В таких условиях работа трансформатора возможна только при пониженной нагрузке. Если обмотки, рассчитанные на соединение треугольником, будут соединены звездой, то при нормальной нагрузке через обмотку пойдет ток в $\sqrt{3}$ раз больше, чем при соединении треугольником, благодаря чему она может чрезмерно нагреться.

§ 58. Работа трехфазного трансформатора вхолостую.

А. *Случай симметричной магнитной цепи.* У трансформаторов с симметричною магнитною цепью, вследствие равенства магнитных сопротивлений для магнитных потоков, намагничивающие токи, или токи холостой работы, во всех фазах одинаковы. Они составляют $^2/_3$ того тока холостой работы, который получился бы, если бы такое же фазное напряжение было подведено только к одной обмотке, ибо магнитодвижущие силы трех фаз, при прохождении трехфазного тока, поддерживают друг друга и дают равнодействующую магнитодвижущую силу, в 1,5 раза превосходящую магнитодвижущую силу одной фазы. В самом деле, предположим, что к одной фазе трехфазного трансформатора с ненасыщенным железом, у которого магнитное сопротивление для потоков всех фаз одно и то же и равно R, подведено фазное напряжение $V_ф$, причем ток в обмотке равен I'_0. В таком случае наибольший магнитный поток в сердечнике 2 будет

$$\Phi'_2 = \frac{0{,}4\pi w_1 \sqrt{2} I'_0}{R}$$

Подведем теперь ко всем обмоткам такое трехфазное напряжение, чтобы у каждой фазы было прежнее фазное напряжение $V_ф$; пусть ток холостой работы при этом будет I_0. Для момента, когда в обмотке сердечника 2 ток имеет наибольшее значение $I_0\sqrt{2}$, а в двух других, следовательно, равен $\frac{1}{2} I_0\sqrt{2}$, потоки, создаваемые фазными обмотками, будут

$$\Phi_2 = \frac{0{,}4\pi\sqrt{2}\, I_0 w_1}{R}; \quad \Phi_1 = \Phi_3 = \frac{0{,}4\pi\sqrt{2}\, I_0 w_1}{2R}.$$

Так как половина потоков фаз 1 и 3 проходит через сердечник 2, то равнодействующий поток в этом сердечнике будет

$$\Phi''_2 = \Phi_2 + \frac{1}{2}\Phi_1 + \frac{1}{2}\Phi_3 = \frac{3}{2}\cdot\frac{0{,}4\pi\sqrt{2}\, I_0 w_1}{R}.$$

Но при равенстве фазных напряжений у обмоток при однофазном токе и при многофазном токе потоки Φ'_2 и Φ''_2 должны быть равны; следовательно

$$\Phi'_2 = \Phi''_2 = \frac{0{,}4\pi\sqrt{2}\,I'_0 w_1}{R} = \frac{3}{2}\,\frac{0{,}4\pi\sqrt{2}\,I_0 w_1}{R}.$$

Из последнего равенства следует:

$$I_0 = \frac{2}{3} I'_0.$$

Последнее соотношение между токами холостой работы при трехфазном и однофазном напряжениях объясняет то увеличение тока при холостой работе трехфазного трансформатора, которое происходит в случае разрыва в какой-либо фазной обмотке.

Приближенное значение тока холостой работы трехфазного трансформатора можно определить следующим образом.

Из выражения для фазной электродвижущей силы находим сначала магнитный поток в стержне, а затем, поделив его на поперечное сечение стержня, определяем магнитную индукцию в нем. По кривой намагничения для железа (см. рис. 72) отыскиваем ампервитки aw, приходящиеся на один сантиметр для вычисленной индукции. Далее, измерив средние пути силовых линий потоков средней и крайних фаз до точек a и b,— на рис. 118 длины $l_1 = l_3$ и l_2,— определяем намагничивающие токи для крайних фаз

$$I_{0xk} = \frac{aw \cdot l_1 + 0{,}8\delta B}{w_1\sqrt{2}}$$

и для средней фазы

$$I_{0xc} = \frac{aw \cdot l_2 + 0{,}8\delta B}{w_1\sqrt{2}}.$$

В этих выражениях B — индукция в железе, а δ — воздушный зазор в стыке, равный примерно 2·0,05 *см*.

Среднее значение намагничивающего тока будет

$$I_{0x} = \frac{2 \cdot I_{0xk} + I_{0xc}}{3}.$$

Чтобы определить активную составляющую намагничивающего тока, вычисляем потери в железе сердечников трансформатора $P_{ж}$. Тогда активная составляющая тока холостой работы

$$I_{0r} = \frac{P_{ж}}{3\,V_1},$$

где V_1 — фазное напряжение.

В таком случае ток холостой работы будет

$$I_0 = \sqrt{I_{0x}^2 + I_{0r}^2}.$$

В. Случай несимметричной магнитной цепи. У трансформатора с несимметричною магнитною цепью магнитные сопротивления фаз-

ных потоков неодинаковы: магнитное сопротивление для средней фазы значительно меньше, нежели для крайних фаз. При одинаковом магнитном насыщении стержней и ярма магнитное сопротивление для средней фазы почти в 2,5 раза меньше, чем для крайних фаз. У трансформаторов с повышенным сечением ярма, т. е. с уменьшенным магнитным насыщением его, отношение магнитных сопротивлений средней и крайних фаз несколько меньше; оно доходит до двух. Вследствие неравенства магнитных сопротивлений необходимые намагничивающие токи фаз неодинаковы: в средней фазе — меньше, в крайних фазах—больше.

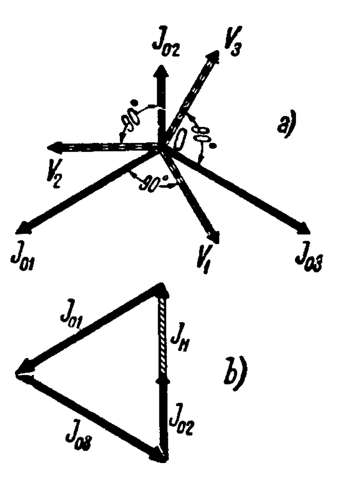


Рис. 116.

Так как при симметричном напряжении, приложенном к первичной обмотке трансформатора, магнитные потоки всех фаз должны быть равны, то неравенство магнитных сопротивлений для разных фаз ведет к тому, что намагничивающие токи этих фаз неодинаковы: в средней фазе намагничивающий ток меньше, нежели в двух крайних фазах.

На рис. 116а изображена примерная диаграмма токов для несимметричного трансформатора в предположении, что намагничивающие токи I_{01}, I_{02}, I_{03} смещены в сторону запаздывания относительно соответствующих напряжений V_1, V_2 и V_3 на 90°.

Если первичная обмотка соединена звездою и нейтраль ее соединена с нейтралью генератора, то в нейтральном проводе будет проходить ток $I_н$, недостающий для замыкания треугольника векторов намагничивающих токов (согласно закону Кирхгофа сумма токов у нейтрали должна быть равна нулю).

Если уничтожить нейтральный провод, то ток его $I_н$, будучи однофазным, распределится по всем трем фазам поровну, т. е. по $^1/_3 I_н$. Действительные токи в этом случае изобразятся векторами I'_{01}, I'_{02}, I'_{03} (рис. 117), полученными сложением векторов тока I_{01}, I_{02} и I_{03} с векторами добавочного тока $^1/_3 I_н$. Из диаграммы рис. 117 видно, что ток I'_{01} отстает от напряжения V_1 на угол больший 90°, а ток I'_{03} отстает от напряжения V_3 на угол меньший 90°. Следовательно у тока I'_{01} первой фазы есть составляющая, направленная против напряжения V_1, приложенного к этой фазе, тогда как у тока I'_{03} третьей фазы есть составляющая, направленная согласно с приложенным к ней напряжением V_3. Это значит, что первая фаза работает как генератор, отдавая мощность сети, а третья фаза работает как приемник, забирая мощность из сети. Последнее обстоятельство заставляет измерять мощность

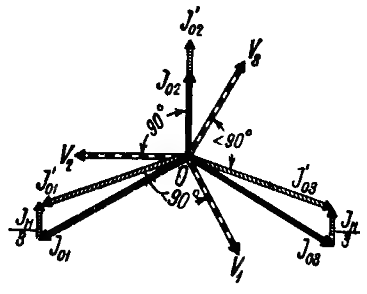


Рис. 117.

холостой работы трансформатора с несимметричною магнитною цепью по способу двух ваттметров.

Добавочный однофазный ток $^1/_3 I_к$, проходя во всех фазах в одном направлении от начальных зажимов к нейтрали или от нейтрали к зажимам, создает во всех стержнях добавочные магнитные потоки, направленные в одну и ту же сторону (рис. 118). В замкнутых железных магнитных цепях они действуют друг против друга. Поэтому добавочные магнитные потоки вынуждены замыкаться через воздух, как это показано на рис. 118 пунктиром. У трансформаторов с масляным баком добавочный магнитный поток может замыкаться и через железные стенки бака, вызывая в них потери от токов Фуко.

Наличие добавочного магнитного потока имеет следствием смещение нулевой точки фазных электродвижущих сил первичных и вторичных обмоток.

Если, например, точка O_1 на рис. 119 была нейтралью системы при существовании нейтрального проводника (без добавочного по-

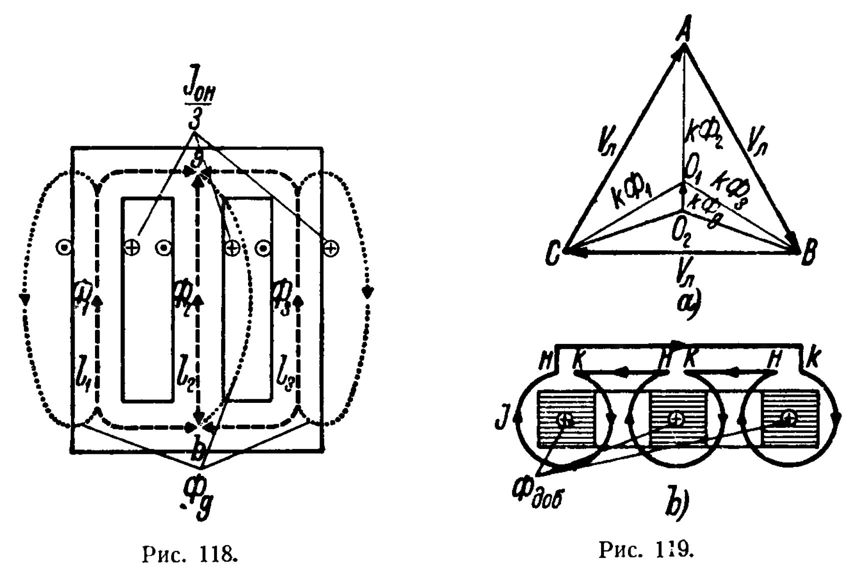


Рис. 118.

Рис. 119.

тока), то под влиянием добавочного потока нейтраль сместится в точку O_2. Вследствие этого магнитные потоки, индуктирующие электродвижущие силы, будут определяться векторами O_2A, O_2B, O_2C. При больших магнитных насыщениях железа, которые иногда допускаются в современных трансформаторах, смещение нейтрали в рассматриваемом случае доходит до $^1/_{100}$ фазного напряжения.

Предположим теперь, что вторичная обмотка соединена треугольником. Эта обмотка представляет собою как бы замкнутый на себя контур, окружающий все стержни сердечника (рис. 119b).

Добавочный однофазный ток, создаваемый первичной обмоткой, будет в этом случае пронизывать этот контур и индуктировать в нем ток, в значительной степени заглушающий добавочный однофазный поток. Таким образом, вредные последствия добавочного потока в этом случае ослабляются.

То же явление наблюдается и при соединении первичных обмоток треугольником, или еще и в том случае, когда у трансформатора имеется третья обмотка или третичная обмотка (см. ранее), соединенная треугольником.

§ 59. Работа трехфазного трансформатора при коротком замыкании.

При коротком замыкании трехфазного трансформатора намагничивающие токи всех фаз весьма малы (ибо потоки незначительны), и потому у несимметричного трансформатора они не могут вызывать неравенства в токах всех фаз при коротком замыкании. Следовательно, если подвести к короткозамкнутому трехфазному трансформатору с симметричною или несимметричною магнитною цепью симметричное (небольшое по величине) трехфазное напряжение, то во всех фазах ток будет один и тот же. Приложенное в этом случае к трансформатору напряжение уравновешивает только активные и реактивные падения напряжения первичной и вторичной обмоток. Забираемая же из сети мощность расходуется исключительно на активные потери в обеих обмотках.

§ 60. Эквивалентные соединения обмоток трехфазного трансформатора.

Соединение обмоток звездою эквивалентно соединению обмоток треугольником, если одно соединение может быть заменено другим соединением без каких-либо изменений в линейных токах первичной и вторичной цепей и вторичного напряжения. Для того чтобы соединение обмоток звездою было эквивалентно соединению обмоток треугольником, необходимо, чтобы между сопротивлениями их короткого замыкания имелось определенное соотношение, которое нетрудно вывести следующим образом.

Пусть $V_{1к}$ — напряжение у первичной обмотки (рис. 120), измеренное между внешними проводами (линейное напряжение при коротком замыкании вторичных обмоток) и $I_{1к}$ — ток внешнего провода (линейный ток). В таком случае полное сопротивление короткого замыкания двух. соответствующих фаз трансформатора, первичные и вторичные обмотки которого соединены звездою, будут

$$z_{к\lambda} = \sqrt{R_к^2 + x_к^2} = \frac{V_{1к}}{I_{1к}\sqrt{3}}.$$

Предположим теперь, что обмотки трансформатора соединены треугольником. Тогда ток в каждой фазе будет равен $\frac{I_{1к}}{\sqrt{3}}$, где

$I_{1к}$ — попрежнему линейный ток. Полное же сопротивление фазы в этом случае будет

$$z_{к\Delta}=\frac{V_{1к}}{\frac{I_{1к}}{\sqrt{3}}}.$$

Сравнивая с полученным уже выражением для $z_{к\lambda}$, получаем

$$z_{к\Delta}=3z_{к\lambda}.$$

Такое же соотношение будет иметь место между активным и реактивным сопротивлениями короткого замыкания звезды и треугольника при условии равенства линейных токов и линейных напряжений, именно

$$R_{к\Delta}=3R_{к\lambda};\ x_{к\Delta}=3x_{к\lambda}.$$

Итак,

при замене соединения обмоток звездою эквивалентным соединением треугольником необходимо повысить сопротивление звезды в три раза и фазный ток в $\sqrt{3}$ раз.

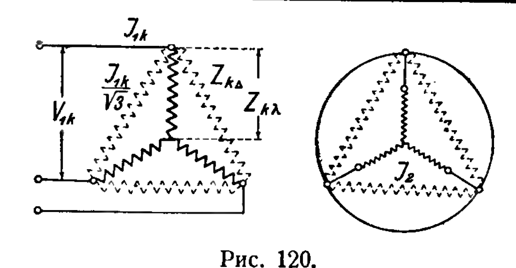


Рис. 120.

Наборот, при замене соединения треугольником эквивалентным соединением звездою необходимо понизить фазные сопротивления в три раза, а фазный ток повысить в $\sqrt{3}$ раз.

Далее нетрудно видеть, что при одном и том же линейном напряжении числа витков фаз эквивалентных соединений должны находиться в отношении $\frac{1}{\sqrt{3}}$, т. е.

$$w_{\lambda}:w_{\Delta}=1:\sqrt{3},$$

ибо

$$V_{ф\lambda}:V_{ф\Delta}=1:\sqrt{3}.$$

§ 61. Вопросы для самопроверки.

1. Какие трехфазные трансформаторы называются с симметричною и несимметричною магнитною цепью?
2. Как соединяются первичные обмотки у стержневых и броневых трансформаторов?
3. В чем разница между холостой работой трансформатора с симметричною и несимметричною магнитною цепью?
4. Почему возникает в трехфазных трансформаторах добавочный магнитный поток?

5. Что называется эквивалентным соединением обмоток звездою или треугольником?
6. Какова связь между сопротивлениями эквивалентных соединений звездою и треугольником?

ГЛАВА ЧЕТЫРНАДЦАТАЯ.

РАБОТА ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ НАГРУЗКЕ.

§ 62. Работа при нагрузке трехфазного трансформатора с обмотками треугольник — треугольник.

Нагрузка трехфазного трансформатора по отношению к его обмоткам может быть симметричной или несимметричной. При симметричной нагрузке в обмотках всех фаз проходят одинаковые токи, а потому падения напряжения в фазах одной и той же обмотки — первичной или вторичной — равны друг другу. Вследствие этого электродвижущие силы обмоток уменьшаются при нагрузке на одну и ту же величину. И если система была симметрична при холостой работе, то она остается такою же и при нагрузке.

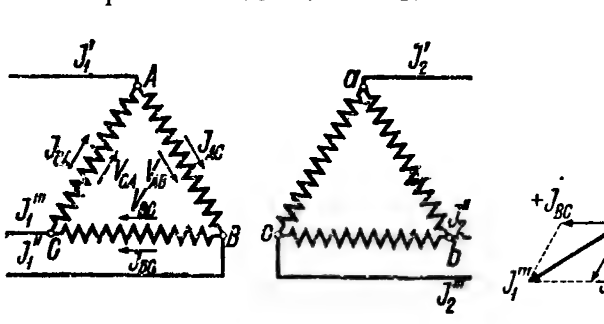
При несимметричной нагрузке, когда токи в фазах обмотки не равны друг другу, падения напряжения в обмотках неодинаковы, и симметрия линейных напряжений холостой работы нарушается: между одними зажимами линейное напряжение понижается, в то же время между другими зажимами оно может даже повыситься. Характер и величина изменения вторичного напряжения в этом случае будет зависеть от способа соединения первичных и вторичных обмоток и от характера и величины нагрузки. В отношении изменения вторичного напряжения всех фаз при симметричной нагрузке все способы соединения обмоток равноценны.

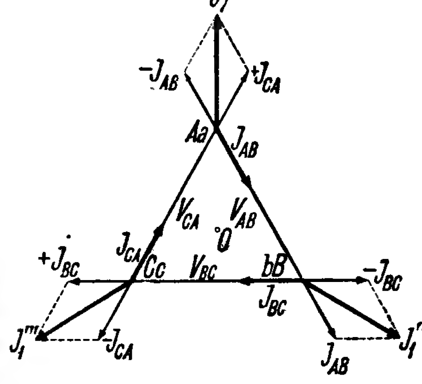
Рассмотрим влияние нагрузки симметричной и несимметричной на вторичное напряжение для двух комбинаций соединения обмоток трансформатора при условии, что первичное напряжение симметрично и постоянно по величине.

А. Нагрузка симметричная. Предположим, что вторичная обмотка *abc* (рис. 121) приведена к первичной. В таком случае диаграммы векторов линейных напряжений первичной и вторичной обмоток при холостой работе почти совпадут и дадут замкнутый треугольник *ABC* (рис. 122).

Допустим, что реактивность нагрузки вторичной цепи такова, что угол сдвига фазных токов I_{AB}, I_{BC} и I_{CA} относительно соответствующих первичных фазных напряжений V_{AB}, V_{BC} и V_{CA} равен нулю (рис. 122). Вследствие падения напряжения от активного и реактивного сопротивлений в обмотках трансформатора потенциалы зажимов вторичной обмотки *a*, *b* и *c* при нагрузке изменятся, что на потенциальной диаграмме выразится смещением потенциалов зажимов *a*, *b* и *c* относительно потенциалов зажимов *A*, *B* и *C*, отвечающих неизменным, по предположению, потенциалам зажимов первичной обмотки (ибо эти потенциалы определяются первичною

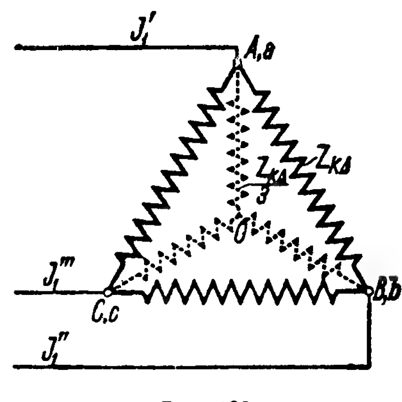
цепью). Чтобы найти новые значения потенциалов зажимов вторичной обмотки, т. е. новые положения потенциалов зажимов a, b и c, а следовательно, и векторов V_{ab}, V_{bc} и V_{ac}, заменим соединение обмоток треугольником, эквивалентным соединением звездой (рис. 123); другими словами, возьмем вместо треугольника звезду, у который линейный ток и линейное напряжение остаются без изменения.


Рис. 121.


Рис. 122.

Линейный ток при соединении треугольником (по закону Кирхгофа) равен геометрической разности токов, прилегающих к линии фаз, т. е.

$$\overline{I_1'} = \overline{I}_{CA} - \overline{I}_{AB};\ \overline{I_1'}' = \overline{I}_{AB} - \overline{I}_{BC};\ \overline{I_1'}'' = \overline{I}_{BC} - \overline{I}_{CA}.$$


Рис. 123.

При равенстве фазных токов и при совпадении их по фазе с линейными напряжениями линейные токи I_1', I_1'' и I_1''' будут совпадать по фазе с фазными напряжениями эквивалентной звезды OA, OB, OC (рис. 122). Так как линейный ток равен геометрической разности фазных токов, то при построении его вектора один вектор фазного тока берется в положительном направлении, т. е. со знаком $+$, а другой — в отрицательном направлении, т. е. со знаком $-$. Фазное напряжение эквивалентной звезды равно фазному напряжению треугольника, деленному на $\sqrt{3}$, а полное сопротивление фазы $z_{k\lambda}$ в 3 раза меньше полного сопротивления фазы треугольника $z_{k\Delta}$ (см. выше). Смещение потенциала какого-либо зажима вторичной обмотки, например a, определим следующим образом. От точки A в направлении, обратном направлению вектора линейного тока I_1', отложим вектор падения напряжения от активного сопротивления $\overline{AD} = I_1' \frac{R_{k\Delta}}{3}$ и по перпендикуляру в точке D к вектору AD отложим вектор падения напряжения от реактивного сопротивления $\overline{Da} = I_1' \frac{x_{k\Delta}}{3}$ в сторону запаздывания относительно линейного тока звезды (рис. 124). Точка a и будет определять потенциал зажима a при нагрузке, а Aa — смещение потенциала, равное полному падению напряжения в трансформаторе $I_1' \frac{z_{k\Delta}}{3}$.

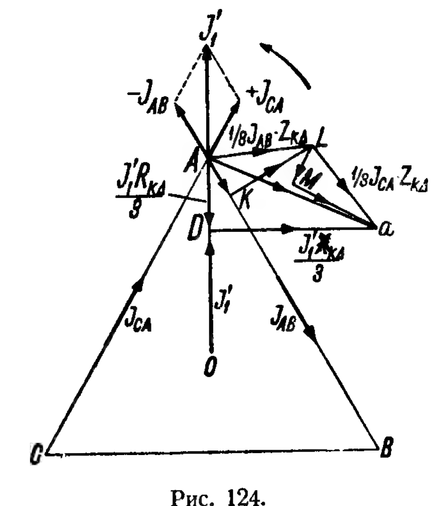
Ту же точку можно, однако, получить, не заменяя треугольника эквивалентной звездой. В самом деле, так как линейный ток I_1' является геометрической суммой фазных токов $+I_{CA}$ и $-I_{AB}$, т. е. $\overline{I_1'} = \overline{I}_{CA} - \overline{I}_{AB}$, то смещение потенциала Aa можно представить в следующем виде:

$$\overline{Aa} = I_1' \frac{z_{k\Delta}}{3} = \frac{1}{3}\ \overline{I_{CA} z_{k\Delta}} - \frac{1}{3}\ \overline{I_{AB} z_{k\Delta}},$$

или

$$\overline{Aa} = \left(\frac{1}{3}\ \overline{I_{CA} R_{k\Delta}} + \frac{1}{3}\ \overline{I_{CA} x_{k\Delta}}\right) - \left(\frac{1}{3}\ \overline{I_{AB} R_{k\Delta}} + \frac{1}{3}\ \overline{I_{AB} x_{k\Delta}}\right).$$

Таким образом, чтобы найти величину и положение вектора смещения потенциала Aa нужно произвести графическое сложение входящих в последнее равенство векторов падений напряжения в примыкающих к узлу A фазах. На рис. 124 это сложение произведено, начиная со второго слагаемого равенства. Так как это слагаемое входит со знаком минус, то мы откладываем сначала вектор $\overline{AK} = \frac{1}{3} I_{AB} R_{k\Delta}$ в направлении тока I_{BA} (тогда как нормально вектор падения напряжения в активном сопротивлении направлен против вектора тока); затем откладываем вектор $\overline{KL} = \frac{1}{3} I_{kA} x_{k\Delta}$ под углом 90° к вектору тока в сторону опережения (тогда как нормально вектор падения в реактивном сопротивлении направлен относительно вектора тока под углом 90° в сторону запаздывания). Далее от точки L в сторону, обратную вектору тока I_{CA}, откладываем вектор $\overline{LM} = \frac{1}{3} I_{CA} R_{k\Delta}$ и от точки M вектор $Ma = \frac{1}{3} I_{CA} x_{k\Delta}$ в сторону запаздывания относительно вектора тока I_{CA}. В результате получим искомую точку a и полное смещение потенциала конца a, равное Aa.


Рис. 124.

Сделав подобное построение и для точек B и C, найдем потенциальный треугольник вторичных напряжений при нагрузке abc

(рис. 125). Этот треугольник смещен относительно потенциального треугольника напряжений при холостой работе ABC и по величине ему уже не равен. Однако стороны его остались равными между собою. Это значит, что падения напряжения между всеми зажимами вторичной цепи одинаковы.

В. Нагрузка несимметричная. Предположим, что нагрузка включена только между двумя зажимами a и b (рис. 126). Так как фаза ab включена параллельно к двум последовательно соединенным фазам ac и cb, то при равенстве полных сопротивлений обмоток всех фаз и незначительной величине намагничивающего тока распределение тока нагрузки I_2' на все фазы вторичной и первичной обмоток будет отвечать рис. 126, т. е. в фазе ab ток равен $\frac{2}{3}I_2'$, где I_2' — ток нагрузки, а в фазах ac и cb ток будет равен $\frac{1}{3}I_2'$, ибо

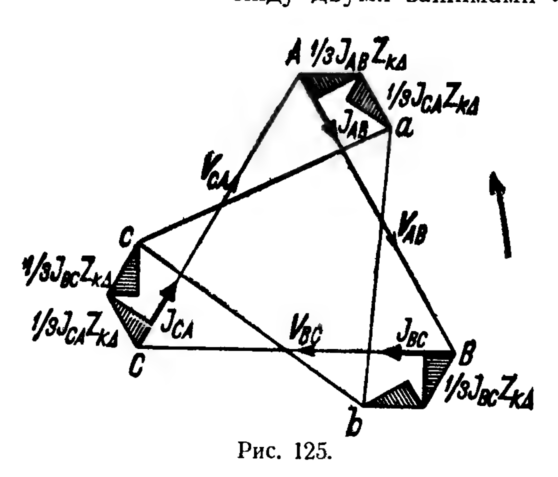


Рис. 125.

сопротивление двух последовательно соединенных фаз ac и cb вдвое больше сопротивления одной фазы ab. Ток во всех фазах является током однофазным, т. е. как в фазе ab, так и в фазах ac и cb ток проходит через наибольшее значение в один и тот же момент времени. Токи во вторичных обмотках уравновесятся токами в первичных обмотках. Это значит, что в первичных фазах ток будет распределяться совершенно так же, как и во вторичных фазах, т. е. в фазе AB он будет $\frac{2}{3}I_1$, где I_1 — линейный ток, подходящий к узлу A, а в фазах AC и CB он будет равен $\frac{1}{3}I_1$. Направления токов таковы, что в линии, подходящей к углу C, ток равен нулю.

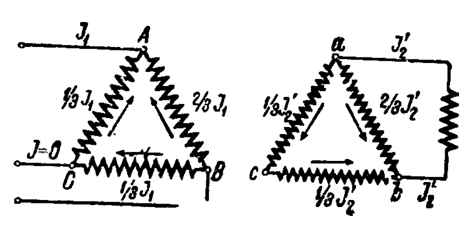


Рис. 126.

Вследствие этого потенциал зажима C при нагрузке не изменится, т. е. точка C потенциальной диаграммы останется на месте, тогда как потенциалы зажима a и b сместятся в одну и ту же сторону по отношению к положению при холостой работе трансформаторов.

На рис. 127 изображена потенциальная диаграмма в предположении, что вторичный ток по фазе совпадает с первичным напряжением между зажимами AB. В ней треугольник ABC — потенциальный треугольник первичных напряжений, треугольник abc — потенциальный треугольник вторичных напряжений при нагрузке. Этот потенциальный треугольник мы получаем на основании следующих

рассуждений. Точка c треугольника cab соответствует неизменному потенциалу зажима C первичной обмотки, а следовательно, и потенциалу зажима c вторичной обмотки. К зажиму C в фазе AC подходит ток $\frac{1}{3}I_1$; от того же зажима C в фазе CB отходит тот же ток $\frac{1}{3}I_1$. Вследствие этого на диаграмме эти токи изобразятся векторами $\overline{Cd}=\frac{1}{3}I_1$ и $\overline{Cf}=\frac{1}{3}I_1$, направленными в разные стороны параллельно вектору AB, ибо токи в фазах AC и CB совпадают во времени с током в фазе AB. Смещение потенциала зажима a происходит от падения напряжения в фазе CA первичной обмотки, равного $\frac{1}{3}I_1z_1$ и в фазе ca вторичной обмотки, равного $\frac{1}{3}I'_2z'_2$. На диаграмме эти падения найдутся, если мы отложим в обратном направлении вектору cd вектор $\overline{AD}=\frac{1}{3}I_1R_1$, обратно направленный к вектору cd и перпендикулярно к нему вектор $\overline{DA_0}=\frac{1}{3}I_1x_1$; затем от точки A_0 отложим вектор $\overline{A_0F}=\frac{1}{3}I'_2R'_2$ и перпендикулярно нему вектор $\overline{Fa}=\frac{1}{3}I'_1x'_2$. Смещение потенциала зажима b происходит от падений напряжения в первичной обмотке фазы CB и во вторичной обмотке фазы cb. На диаграмме смещение потенциала зажима b находится совершенно так же, как и смещение потенциала конца a, имея в виду, что вектор тока фазы $\overline{CB}$ есть вектор Cf.

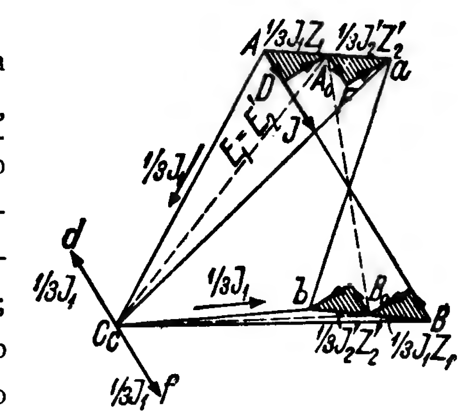


Рис. 127.

Потенциалы зажимов a и b можно было бы определить, исходя из того, что относительно середины фазы AB, потенциал которой можно принять равным нулю, потенциалы зажимов a и b взаимно противоположны. Поэтому потенциалы зажимов a и b должны быть смещены каждый на величину падения в половине фазы AB в взаимно противоположные стороны.

Из диаграммы 127 видно, что при рассматриваемой несимметричной нагрузке напряжения нагружаемой фазы и одной из прилегающих к ней понижаются, а напряжение другой прилегающей фазы повышается.

§ 63. Работа при нагрузке трехфазного трансформатора с обмотками звезда — звезда и треугольник — звезда.

А. Нагрузка симметричная, ток совпадает по фазе с первичным фазным напряжением. Подобно предыдущему потенциальный тре-

угольник напряжения при нагрузке можно построить следующим образом (рис. 128). От точки A, отвечающей потенциалу зажима

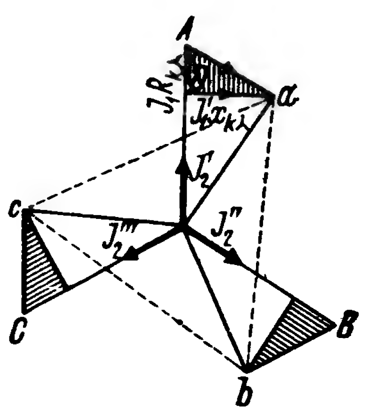


Рис. 128.

вторичной обмотки a при холостой работе, откладываем в направлении, обратном вектору тока I'_2, вектор AD, равный $I'_2 R_{\kappa\lambda} = I_1' R_{\kappa\lambda}$ и по перпендикуляру — вектор Da, равный $I'_2 x_{\kappa\lambda} = I'_1 x_{\kappa\lambda}$; здесь $R_{\kappa\lambda}$ и $x_{\kappa\lambda}$ — активное и реактивное сопротивления первичной и вторичной обмоток соответствующих фаз. Точка a и даст нам потенциал зажима вторичной обмотки a при нагрузке. Сделав подобное построение для других точек B и C, получим потенциальный треугольник вторичного напряжения abc.

B. Нагрузка несимметричная. Если нагрузку включить между двумя проводами вторичной цепи (рис. 129) то ток будет проходить только по прилегающим к этим проводам фазам вторичной обмотки и, следовательно, по фазам первичной обмотки, сопряженным с первыми.

Таким образом, в фазе oc вторичной обмотки ток будет равен нулю, а в фазе OC первичной обмотки будет проходить только намагничивающий ток.

Заменив соединение обмоток звездой эквивалентным соединением треугольником, мы получим систему, аналогичную уже рассмотренной ранее. Поэтому и построение точек, отвечающих потенциалам зажимов a и b, при нагрузке не будет отличаться от приведенного на рис. 127. И в данном случае фазные напряжения не равны: у одной из нагруженных фаз напряжение больше, а у другой меньше напряжения третьей, нагруженной фазы. Подобным же способом можно было бы исследовать другие комбинации соединения первичных и вторичных обмоток: звезда — треугольник, треугольник — звезда.

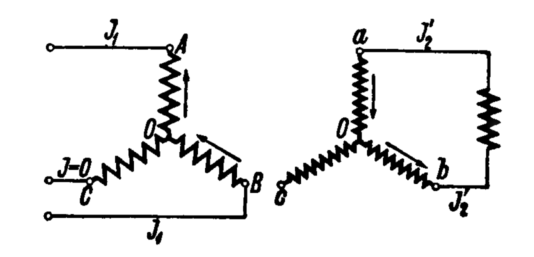
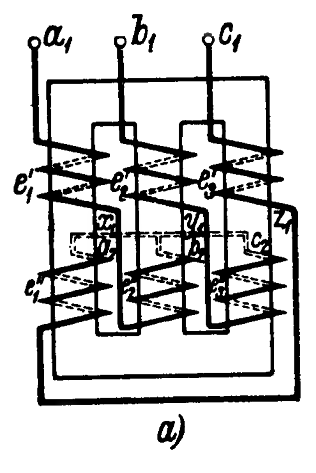


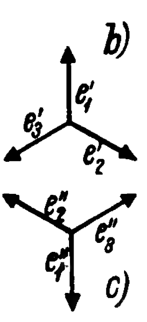
Рис. 129.

При соединении первичной обмотки треугольником и вторичной — звездою с нулевым проводом во вторичной цепи имеются два напряжения: фазное V_ϕ и линейное $V_л = \sqrt{3}\, V_\phi$. Осветительная нагрузка приключается к низшему напряжению, т. е. к крайним проводам и нейтральному; силовая — к высшему напряжению, т. е. к крайним проводам. Само собою разумеется, нейтральный провод должен иметь надлежащее сечение. Работа отдельных фаз при указанном соединении почти совершенно независима: нагрузка одной фазы не отзывается заметно на напряжении двух других фаз. Поэтому определение падения напряжения можно вести независимо для каждой фазы.

§ 64. Зигзаг-трансформатор.

У зигзаг-трансформатора вторичная обмотка каждой фазы состоит из двух катушек. Одна катушка расположена на одном сердечнике, а другая — на другом, причем конец первой катушки, например x_1, соединен с концом второй катушки, например y_2 (рис. 130а). Все начала вторых катушек соединены в нейтраль. Благодаря такому соединению катушек электродвижущие силы их не будут совпадать по фазе, а будут смещены на 120°. В самом деле, если бы первые катушки всех стержней были соединены своими концами x_1, y_1 и z_1 в





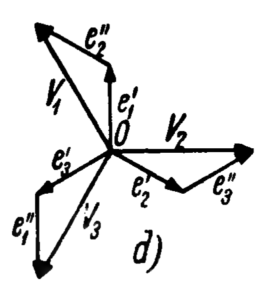


Рис. 130.

нейтраль, то электродвижущие силы их e'_1, e'_2 и e'_3 дали бы векторную звезду, изображенную на рис. 130b; если бы вторые катушки всех стержней были соединены своими началами a_2, b_2 и c_2 в нейтраль, то электродвижущие силы их e''_1, e''_2 и e''_3 дали бы векторную звезду, повернутую относительно первой на 180° (рис 130 с). При соединении же катушек зигзагом электродвижущие силы катушек геометрически сложатся так, как указано на рис. 130d. Из последнего рисунка видно, что фазные напряжения V_1, V_2, V_3 будут равны геометрической сумме напряжений соответствующих катушек, причем

$$V_1 = V_2 = V_3 = \sqrt{3} e_1 = \sqrt{3} e_2.$$

Если бы были соединены катушки одного сердечника, то фазные напряжения были бы равны алгебраической сумме напряжений катушек, т. е.

$$V_1 = V_2 = V_3 = 2e_1 = 2e_2.$$

Таким образом при одном и том же числе витков вторичной обмотки у зигзаг-трансформатора напряжение будет меньше в $\frac{\sqrt{3}}{2} = 0{,}866$, чем у трансформатора с нормальным соединением катушек. Наоборот, при одном и том же вторичном напряжении

зигзаг-трансформатор потребует больше витков для вторичной обмотки, чем обычный трансформатор. Если w_2 число витков вторичной обмотки обычного трансформатора, то необходимое число витков вторичной обмотки зигзаг-трансформатора должно быть равно $\frac{w_2}{0,866} = 1,155\ w_2$, т. е. на 15% больше, нежели у обычного трансформатора.

Вследствие расположения вторичных обмоток на двух сердечниках несимметричная нагрузка ложится на все фазы в более или менее одинаковой степени, поэтому заметного неравенства в напряжениях фаз не получается.

§ 65. Вопросы для самопроверки.

1. Трехфазный трансформатор 300 kVA; $V_1 : V_2 = 11\,000 : 2200$ V, $f = 50$ Hz с первичною и вторичною обмотками, соединенными треугольником, работает на активную нагрузку с полною мощностью. Как изобразится диаграмма этого трансформатора, если известны следующие данные опыта короткого замыкания: $V_{1к} = 310$ V, $I_{1к.\,л} = 15,8$ A, $P_{1к} = 3000$ W? Предполагается, что активные и реактивные сопротивления обмоток, приведенные к одной обмотке (первичной), соответственно равны друг другу.
2. Как изобразится диаграмма того же трансформатора в предположении, что он нагружен однофазною активною нагрузкою 100 kW.
3. Начертить схему зигзаг-трансформатора.

ГЛАВА ПЯТНАДЦАТАЯ.

СПЕЦИАЛЬНЫЕ СЛУЧАИ ТРАНСФОРМИРОВАНИЯ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА.

§ 66. Трансформирование трехфазного тока двумя однофазными трансформаторами.

А. V-образное соединение или соединение открытым треугольником. Под соединением двух однофазных трансформаторов открытым треугольником подразумевается такое соединение, при котором два конца первичных или вторичных обмоток соединены между собою и вместе с двумя оставшимися концами обмоток подключены к трехфазной сети (рис. 131). В этом случае напряжение на свободных концах *cb* вторичных обмоток является равнодействующим из напряжений двух фаз обмоток *ac* и *ab*. V-образное соединение легко получить из соединения трех однофазных трансформаторов закрытым треугольником, если совершенно отсоединить один из трансформаторов.

На рис. 132a и 132b приведены диаграммы токов и электродвижущих сил закрытого и открытого треугольников для случая активной нагрузки, когда при закрытом треугольнике фазные токи совпадают по фазе с фазными напряжениями, а линейные токи — с линейными напряжениями. В этих диаграммах E_{21}, E_{22}, E_{23} — вторичные электродвижущие силы; V_{21}, V_{22}, V_{23} — вторичные напряжения; I_{21}, I_{22}, I_{23} — фазные токи; $I_{ла}$, $I_{лв}$, $I_{лс}$, — линейные точки; $I_{21}x_2$ и $I_{21}R_2$ — падения напряжения от реактивного и активного сопротивлений. На диаграмме для закрытого треугольника (рис. 132a) линейные токи получены путем геометрического сложения фазных токов (см. сложение I_{21} и $-I_{23}$); они сдвинуты по фазе относительно соответствующих фазных напряжений на 30°.

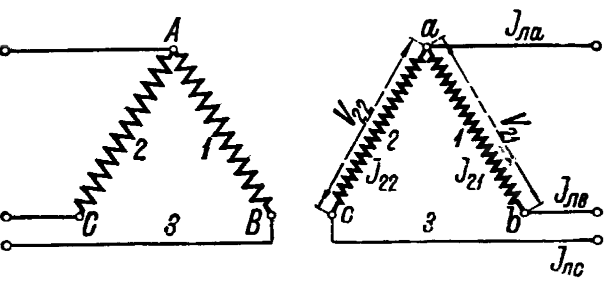


Рис. 131.

При открытом треугольнике в фазах *ав* и *ас* приходят уже линейные токи $I_{лв}$ и $I_{лс}$ (рис. 131), которые при том же характере

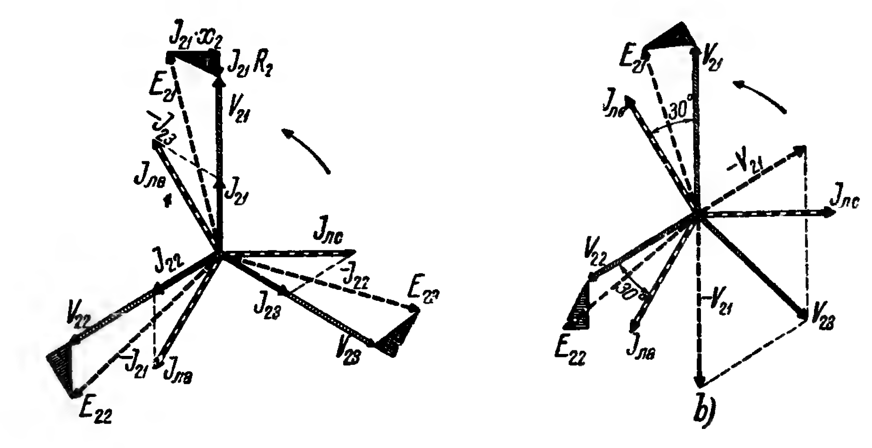


Рис. 132.

нагрузки, что и при закрытом треугольнике, должны попрежнему составлять угол 30° с фазными напряжениями V_{21} и V_{22} (рис. 132b). Напряжение между зажимами *b* и *c* V_{23} получается путем геометрического сложения V_{22} и $-V_{21}$.

Так как в каждом трансформаторе открытого треугольника при активной внешней нагрузке ток составляет с напряжением угол 30°, то, следовательно, каждый трансформатор при активной нагрузке работает с коэфициентом мощности $\cos\varphi = 0,866$. Поэтому, если в трехфазной системе, состоящей из трех однофазных трансформаторов, один трансформатор исключить, то отдаваемый

ток (а следовательно и мощность) должен быть понижен не до $\frac{2}{3}$ от 100%, а до $\frac{2}{3}$ от 86,6%, т. е. до 58%, при условии одинакового нагрева трансформаторов, ибо при открытом треугольнике ток линии целиком проходит через обмотки трансформатора.

Если при закрытом треугольнике установленная мощность равна $3I_ф V_ф = \sqrt{3} I_л\ V_л$, то при открытом треугольнике установленная мощность должна быть равна $2\,I_л\ V_л$, т. е. на $\frac{2-1{,}73}{1{,}73} = 15{,}5\%$ больше, причем эта мощность доставляется двумя трансформаторами, а не тремя, как при закрытом треугольнике.

Недостатком соединения открытым треугольником является некоторая несимметрия напряжений при нагрузке в виду того, что сопротивления для линейных токов неодинаковы.

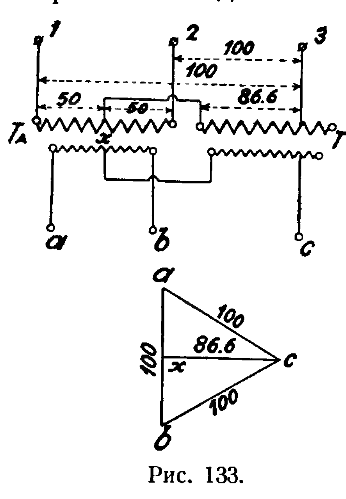


Рис. 133.

В. Т-образное соединение. Схема соединения обмоток трансформаторов для этого случая и векторная диаграмма напряжений указаны на рис. 133. На этом рисунке T_A — главный трансформатор, T_B — вспомогательный трансформатор, который может быть рассчитан на напряжение, равное 86,6% линейного. Обычно он берется, однако, одинаковым с главным, но работает с уменьшенным числом витков, т. е. с уменьшенным напряжением. Точка x находится посредине обмоток главного трансформатора. Напряжение между точками x и c равно 86,6% от напряжения между точками a и c или $в$ и c. Мощность T-образного соединения та же, что и V-образного соединения. Так как вспомогательный трансформатор работает с пониженным потоком, то коэфициент полезного действия этой системы несколько выше, чем V-образной системы.

§ 67. Преобразование трехфазного тока в двухфазный и обратно.

Трехфазный ток можно преобразовать в двухфазный и обратно, двухфазный — в трехфазный несколькими способами. Наиболее распространенным на практике (в особенности в Америке) является способ Скотта, требующий всего двух однофазных трансформаторов. Схема включения трансформаторов по способу Скотта указана на рис. 134. Первичные обмотки обоих трансформаторов T_1 и T_2 соединены с зажимами двухфазного генератора T; конец вторичной обмотки одного трансформатора T_1 металлически соединяется со средней точкой d вторичной обмотки другого трансформатора T_2.

Если коэфициент трансформации трансформатора T_2 равен $\frac{w_1}{w_2}$, где w_1 и w_2 — числа витков первичной и вторичной обмоток, то у трансформатора T_1 коэфициент трансформации берется равным $\frac{1}{2}\sqrt{3}\,\frac{w_1}{w_2} = 0{,}866\,\frac{w_1}{w_2}$. В таком случае, при равенстве напряжений фаз двухфазного генератора, напряжения между точками $b - c$ и $a - d$ вторичных обмоток трансформаторов будут относиться как $1 : \frac{1}{2}\sqrt{3}$; напряжения же между точками $a - c$, $a - b$ и $b - c$ будут равны между собою и сдвинуты по фазе на 120°, т. е. вторичные обмотки трансформаторов дадут симметричную трехфазную систему. Само собою разумеется, тем же способом трехфазный ток можно преобразовать в двухфазный.

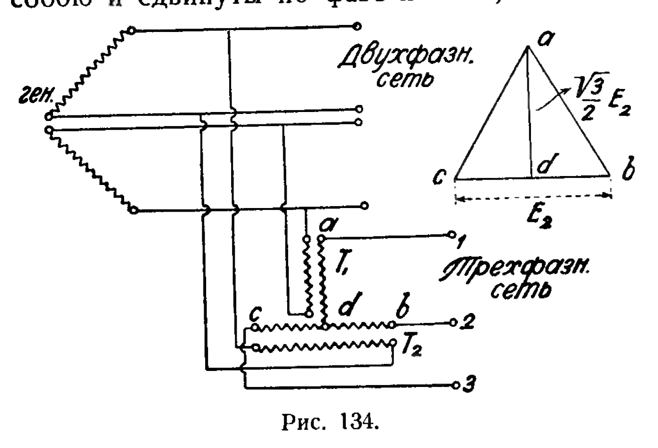


Рис. 134.

Способ Скотта в большом масштабе применяется в настоящее время в Америке, ибо он дает возможность работать параллельно старым станциям двухфазного тока с новейшими станциями трехфазного тока.

§ 68. Преобразование трехфазного тока в шестифазный.

Трехфазный ток легко преобразуется в шестифазный или с помощью трех однофазных трансформаторов, или с помощью одного трехфазного трансформатора. Первичные обмотки соединяются между собою звездой или треугольником. Вторичные же обмотки делятся на две равные части, образуя две группы совершенно одинаковых обмоток, из которых затем составляются или две звезды, или два треугольника, взаимно повернутые на 180°. Если, например, на рис. 135 соединить металлически середины вторичных обмоток, то из одной группы половин получилась бы звезда abc, а из другой — звезда xyz, причем они имели бы общую нейтраль O. Так как по отношению к этой нейтрали потенциалы концов a, b, c прямо противоположны потенциалам соответственных концов x, y, z, например, в момент, когда конец a имеет потенциал $+$, конец x будет иметь потенциал $-$, то векторы электродвижущих сил Oa, Ob и Oc будут прямо противоположны векторам Ox, Oy и Oz, т. е. звезда abc будет повернута относительно звезды xyz на 180°. В общем же на концах a, b, c, x, y, z мы получим шестифаз-

ное напряжение, другими словами, систему напряжений, сдвинутых по фазе взаимно на 60°.

С целью получить более равномерное распределение токов

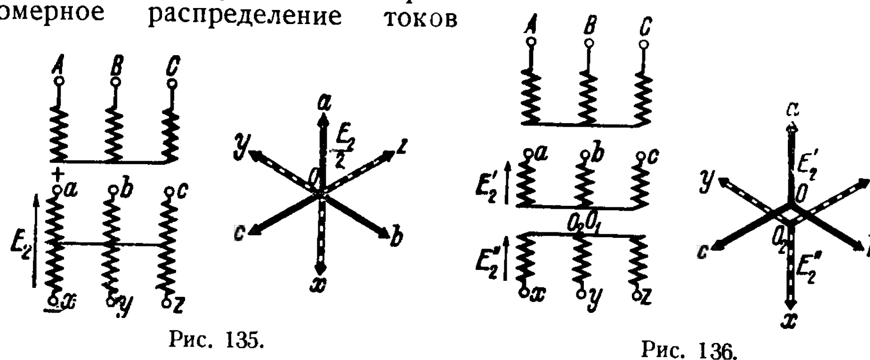


Рис. 135. Рис. 136.

вторичные обмотки можно разделить на независимые половины и из них составить две звезды с двумя независимыми нейтралями: у одной группы обмоток в нейтраль соединяются начала, у другой группы—концы обмоток (рис. 136). Лишь в этом случае получаются две звезды векторов электродвижущих сил, повернутых взаимно на 180°. Из тех же половин можно, однако, получить и два треугольника, повернутые на 180° (рис. 137), соединяя у одной группы концы в порядке: a_1+y_1, b_1+z_1, c_1+x_1, а у другой в порядке: a_2+z_2, y_2+c_2, x_2+b_2.

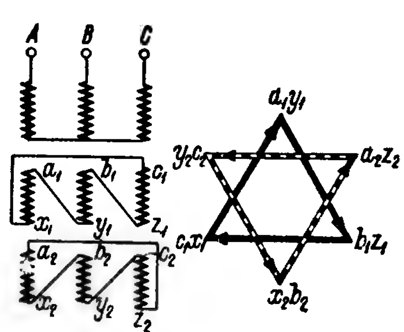


Рис. 137.

Шестифазное напряжение применяется для питания одноякорных преобразователей и ртутных выпрямителей.

В применении к ртутным выпрямителям шестифазная система осуществляется часто соединением вторичных обмоток трансформатора двойным зигзагом. В этом случае на каждом стержне имеются три одинаковых обмотки, которые соединяются между собою так, как указано на рис. 138. Нижние три обмотки своими концами a_3, b_3 и c_3 соединены в нейтраль. Их электродвижущие силы дают векторную звезду $Ox_3\ y_3\ z_3$ (рис. 138 b). С каждым концом $x_3\ y_3\ z_3$

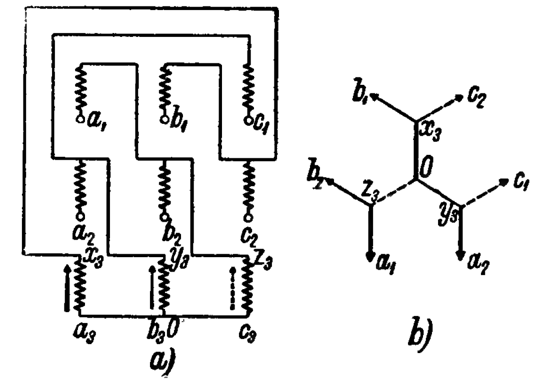


Рис. 138.

соединены параллельно по две обмотки, находящиеся на двух других стержнях. Так как электродвижущие силы этих стержней по фазе смещены на 120°, то в общем векторная диаграмма всех электродвижущих сил изобразится рисунком 138 b. Легко видеть, что напряжения между концами $a_1b_2b_1c_2c_1a_2$ во времени смещены взаимно на 60°, т. е. вторичная система представляет собою шестифазную систему.

§ 69. Двухфазный трансформатор.

При трансформировании двухфазного тока пользуются обычно двумя отдельными трансформаторами однофазного тока, первичные и вторичные обмотки которых или совершенно не связаны непосредственно (рис. 139 a), или же имеют общую нейтральную точку (рис. 139 b). Двухфазный ток трансформируется иногда и одним трансформатором. Такой трансформатор имеет три сердечника (рис. 140), из которых два крайние заняты обмотками обеих

Рис. 139. Рис. 140.

фаз, а средний свободен от обмоток и служит для проведения магнитных потоков. Если Φ_a и Φ_c — потоки в сердечниках с обмотками, то равнодействующий поток в среднем сердечнике будет $\Phi_в = \sqrt{2}\,\Phi_a = \sqrt{2}\,\Phi_c$, ибо потоки Φ_a и Φ_c взаимно сдвинуты по фазе на 90°. При одной и той же индукции сечение среднего сердечника должно быть, следовательно, в $\sqrt{2}$ раз больше сечения одного из крайних. Вследствие этого объем железа такого трансформатора лишь немногим меньше объема двух отдельных однофазных трансформаторов. Так как, к тому же, трансформирование отдельными однофазными трансформаторами дает более надежное устройство, то оно на практике и предпочитается.

§ 70. Вопросы для самопроверки.

1. Каковы особенности трехфазного трансформатора с обмотками, соединенными открытым треугольником?
2. В чем заключается схема Скотта?
3. Как преобразуется трехфазный ток в шестифазный?
4. Как устроен двухфазный трансформатор?

ГЛАВА ШЕСТНАДЦАТАЯ.

ВЫСШИЕ ГАРМОНИКИ В ТРЕХФАЗНЫХ СИСТЕМАХ.

§ 71. Высшие гармоники в трехфазных системах с применением однофазных и трехфазных трансформаторов.

Рассматривая явления в однофазном и трехфазном трансформаторах при холостой работе, мы видели, что для того, чтобы магнитный поток был синусоидальным (при синусоидальном первичном напряжении), необходимо, чтобы намагничивающий ток был несинусоидальным, и что в этом токе должны иметься главным образом третья и пятая гармоники. Эти гармоники особенно заметны у современных трансформаторов, строящихся с относительно большим насыщением, и составляют часто 10—50% от основной гармоники.

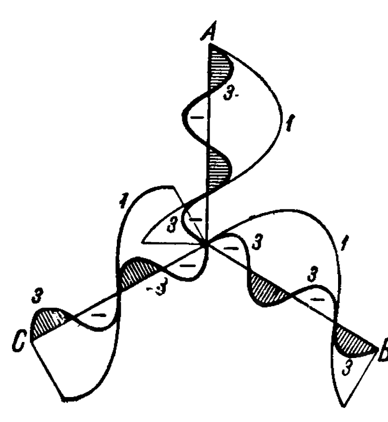


Рис. 141.

Синусоидальный поток дает вторичное напряжение однофазного трансформатора также синусоидальное. При трансформировании трехфазного тока, в виду обязательной связи между электрическими цепями, т. е. обмотками, и возможной связи между магнитными цепями, т. е. сердечниками всех фаз, некоторые высшие гармоники в намагничивающем токе могут быть, но могут и не быть — в зависимости от способа трансформирования тока.

A. Случай трансформирования трехфазного тока однофазными трансформаторами. Если трансформирование тока осуществляется с помощью трех однофазных трансформаторов, первичные обмотки которых соединены звездою, и между нейтралью трансформаторов и нейтралью генератора имеется электрическая связь в виде нейтрального провода, то токи третьей гармоники могут проходить по фазным обмоткам трансформаторов совершенно независимо друг от друга. Эти токи имеют одно и то же направление: от генератора к трансформаторам или же от трансформаторов к генератору. Во всех фазах они проходят через нуль или через наибольшее значение в один и тот же момент времени. Последнее можно иллюстрировать рис. 141, на котором изображены волны главной гармоники *1* с их сдвигом на 120° и волны третьей гармоники *3*. Всматриваясь в рисунок, мы замечаем, что у нулевой точки сошлись все три отрицательные волны третьей гармоники и ни одна не может перейти в положительную волну. Это значит, что токи третьих гармоник всех трехфазных обмоток совпадают по фазе. Но если мы к нейтрали подведем нейтральный провод, то в нем будет проходить ток, равный сумме трех токов третьей гармоники. У трансформаторов, рассчитанных с большим насыщением ($B > 12\,000$), гармоники третьего порядка, как мы видели ранее, довольно значительны. Поэтому и ток гармоники третьего порядка в нейтральном проводе может быть весьма заметным.

Предположим теперь, что между нейтралями генератора и трех однофазных трансформаторов нейтрального провода нет. Так как токи третьей гармоники совпадают по фазе, то нейтральная точка трансформаторов для них, как показывает рис. 141, непроходима.

Вследствие отсутствия в намагничивающем токе тока третьей гармоники магнитный поток в этом случае уже не будет синусоидальным, а будет содержать третью гармонику. Не будут синусоидальны и фазные напряжения первичной и вторичной обмоток, хотя бы первичное линейное напряжение было синусоидально; в этих напряжениях появится третья гармоника. Последнего обстоятельства не следует упускать из виду при расчете изоляции трансформатора, ибо третья гармоника может заметно повысить амплитуду основной гармоники, следовательно, повысить напряжение, действующее на изоляцию. В линейном вторичном напряжении третьей гармоники и в данном случае не будет, ибо фазные третьи гармоники напряжения при сложении уничтожаются (имея одновременно направление или к нейтрали или от нейтрали).

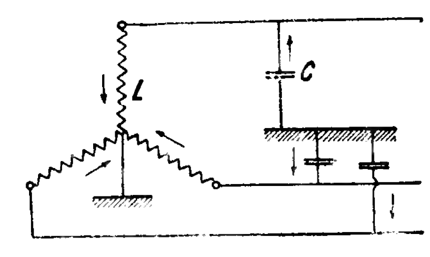


Рис. 142.

Наличие третьей гармоники в фазном напряжении при длинных линиях передач нежелательно как для линии, так и для самого трансформатора, и тогда, когда нейтраль вторичной обмотки почему-либо будет заземлена. На рис. 142 дана схема для этого случая, причем емкость провода относительно земли заменена емкостью конденсаторов *c*. Ток третьей гармоники, проходящий в проводе и в фазной обмотке, будет определяться сопротивлением $2\pi f_3 L - \frac{1}{2}\pi f_3 C$, где $2\pi f_3 L$ — реактивное сопротивление фазной обмотки трансформатора, а $\frac{1}{2}\pi f_3 C$ — то же конденсатора, причем $f_3 = 3f_1$, если f_1 — первичная частота. Возможны три случая: a) емкость провода велика, — тогда появится отстающий ток, который значительно ослабит третью гармонику потока, b) емкость равна по действию самоиндукции, — тогда наступит резонанс с возможностью повышения напряжения третьей гармоники потока, и c) емкость очень мала, тогда в цепи пойдет опережающий ток, который усилит искажение магнитного потока, так как создаваемый им поток будет складываться с третьей гармоникой главного потока; третья гармоника напряжения может увеличиться настолько, что появится опасность пробоя изоляции как трансформатора, так и линии.

Если трансформирование трехфазного тока производится помощью трех однофазных трансформаторов, соединенных со стороны первичной обмотки — звездой, а со стороны вторичной — треугольником, и нейтраль звезды изолирована, то магнитный поток транс-

форматора будет синусоидальным, так как недостающий в первичной цепи ток третьей гармоники будут даваться вторичными обмотками. В самом деле, так как вторичные обмотки замкнуты треугольником, а все третьи гармоники фазных электродвижущих сил имеют одно направление, то в замкнутом треугольнике они дадут ток третьей гармоники (рис. 143), который создает поток также третьей гармоники, восполняющий основной поток. В результате этот поток будет синусоидальным, а с ним будут синусоидальными фазные напряжения первичной обмотки; в линейном вторичном напряжении третьей гармоники также не будет. В том случае, когда первичные обмотки трех однофазных трансформаторов соединены треугольником, а вторичные — звездою, потоки и фазные напряжения также синусоидальны, так как третья гармоника намагничивающего тока находит путь в замкнутом первичном треугольнике.

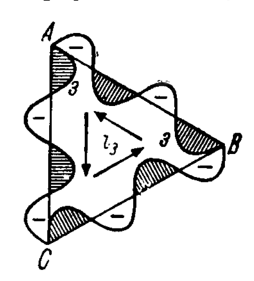


Рис. 143.

Итак,

> **для того, чтобы магнитный поток, а следовательно, фазные напряжения не содержали третьей гармоники, необходимо соединить треугольником или первичные или вторичные обмотки.**

С целью понизить напряжение, действующее на изоляцию, звездою соединяют обычно обмотки высшего напряжения, а треугольником — обмотки низшего напряжения.

Если на станции имеется несколько трансформаторных групп, соединенных параллельно, то можно ограничиться соединением вторичных обмоток треугольником лишь одной из всех трансформаторных групп. В самом деле, пусть имеются всего две группы трансформаторов, работающих параллельно и включенных так, как указано на рис. 144. Так как нейтрали обеих групп связаны между собою, то третьи гармоники напряжения первой группы пошлют (через нейтральный провод) во вторую группу ток, направленный прямо противоположно тому току, который нужен для второй группы, чтобы уничтожить искажение потоков, т. е. этот ток будет усиливать искажение потока. Но у второй группы вторичные обмотки соединены треугольником, и потому в них могут проходить токи третьей гармоники. В данном случае в этих обмотках

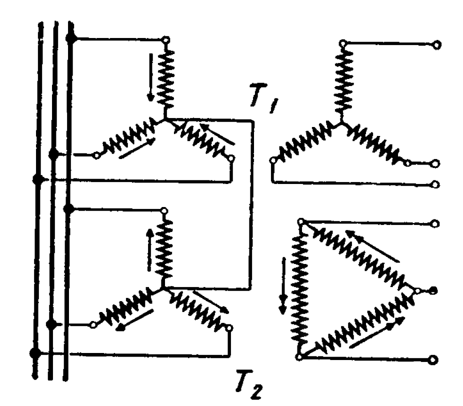


Рис. 144

будут проходить два тока: один — для надлежащего намагничивания второй группы, и другой — для компенсирования тока первой группы трансформаторов. В общем, в трансформаторах обеих групп не будет искажения потока: треугольник второй группы трансформаторов будет давать токи третьей гармоники для обеих групп. Следует отметить, что при этом вторичные обмотки второй группы могут быть перегружены токами третьей гармоники.

Соединение обмоток треугольником не всегда удобно: часто у понижающих трансформаторов желательно иметь обмотку низкого напряжения, соединенную звездою с целью заземления вторичной обмотки или же использования нейтрального провода. В таком случае первичные обмотки приходится соединять треугольником, а если звездой, то нейтраль этой звезды соединяется иногда с нейтралью вторичной звезды отправительного трансформатора (повысительного трансформатора станции) изолированным, так называемым уравнительным проводом. Этот последний замыкает накоротко третьи гармоники фазных электродвижущих сил, что имеет следствием синусоидальность потоков.

При соединении первичных и вторичных обмоток звездою, что требуется при заземлении со стороны низшего и высшего напряжений, иногда пользуются трехобмоточными трансформаторами, соединяя треугольником третьи или дополнительные обмотки трансформаторов, независимо от первых двух. Если нейтраль заземлена, то треугольник из дополнительных обмоток, называемый иногда „третичным“, должен быть рассчитан на мощность короткого замыкания трансформатора; если же нейтраль не заземлена, то третичный треугольник рассчитывается только на намагничивающий ток третьей гармоники. Третичным треугольником можно воспользоваться для обслуживания самой станции или подстанции, или для питания сихронного конденсатора (т. е. синхронного двигателя, работающего перевозбужденным вхолостую с целью исправления коэфициента мощности).

В. Случай трансформирования трехфазным трансформатором. При трансформировании трехфазного тока трехфазным трансформатором явление в отношении высших гармоник протекает различно в зависимости от того, имеется ли броневой или стержневой трансформатор. У броневого трансформатора магнитные цепи отдельных фаз независимы, и потому у него третья гармоника проявляет себя совершенно так же, как и при трансформировании тока тремя отдельными трансформаторами.

У стержневого трансформатора все фазы магнитно связаны между собою, т. е. имеют общую магнитную цепь. Вследствие этого явление в отношении высших гармоник протекает несколько иначе, чем у броневого трансформатора. Если первичные и вторичные обмотки стержневого трансформатора соединены звездою и нейтраль первичных обмоток соединена с нейтралью генератора, то при синусоидальном напряжении намагничивающие токи будут иметь третьи гармоники, которые находят себе путь через нейтральный провод (рис. 145). Магнитный поток в этом случае будет синусоидальным, точно так же будет синусоидальным и вторичное напряжение. Если же между трансформатором и генератором не

будет нейтрального провода, то в намагничивающих токах не будет и третьей гармоники. Это значит, что магнитные потоки всех трех сердечников трансформатора не будут синусоидальными, т. е. в составе их появятся добавочные потоки третьего порядка. Эти добавочные потоки третьего порядка направлены в одну сторону (см. рис. 118), ибо компенсирующие их токи третьей гармоники при наличии нулевого провода направлены, как мы знаем, в одну сторону. Легко видеть из рис. 118, что добавочные потоки третьей гармоники вынуждены замыкаться через воздух. Вследствие этого они в рассматриваемом случае стержневого трансформатора будут слабы. Незначительно будет, следовательно, и искажение кривой фазных напряжений. В то время как у броневых трансформаторов оно может достигнуть 50%, у стержневых оно достигает только 5%. Наличие добавочного однофазного магнитного потока третьей гармоники влечет за собою смещение нейтрали электродвижущих сил (см. рис. 119). Это смещение, однако меньше, чем у группы однофазных трансформаторов, так как у последних потоки третьей гармоники замыкаются в железной части сердечника и по величине превосходят потоки третьей гармоники стержневого трансформатора.

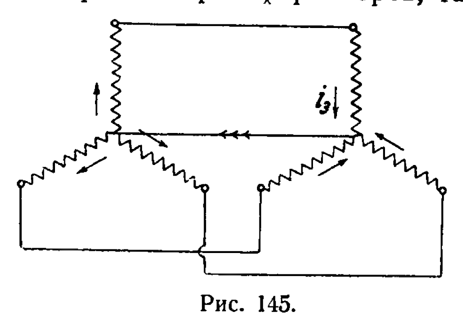


Рис. 145.

Добавочные потоки третьей гармоники у стержневого трансформатора будут ослаблены еще в большей мере, если одна из обмоток (первичная или вторичная) соединена треугольником. Как уже было выяснено, в рассматриваемом случае в обмотке, замкнутой треугольником, будут проходить токи третьей гармоники, которые необходимы для получения синусоидального магнитного потока.

Слабым реагированием потока стержневого трансформатора на токи третьей гармоники можно воспользоваться для уменьшения искажения потока в броневых трансформаторах, а также при соединении трех отдельных трансформаторов, соединенных звездою. С этой целью заставляют броневой трансформатор работать параллельно со стержневым, причем соединяют между собою нейтрали первичных обмоток. В таких условиях под действием разности напряжений третьих гармоник обоих трансформаторов в их обмотках появится ток третьей гармоники, который будет ослаблять напряжение третьей гармоники броневого трансформатора и усиливать — стержневого, ибо этот ток в стержневом трансформаторе пойдет в направлении, обратном тому току, который должен был бы ослабить потоки третьей гармоники. Если положить, что третья гармоника напряжения составляет у броневого трансформатора 50%, а у стержневого — 5% от основной гармоники, то циркулирующий ток составит $\frac{45}{53} \cdot 100 = 81{,}8\%$ того тока, который уничтожил бы третьи гармоники в обоих трансформаторах. Этот ток уменьшит искажение потока броневого трансформатора с 50%

до $(50 - 50 \cdot 0{,}818) = 9{,}1\%$, а искажение потока стержневого трансформатора увеличит с 5% до $(5 + 5 \cdot 0{,}818) = 9{,}1\%$. Из этого примера ясно, как значительно стержневой трансформатор умеряет третьи гармоники фазных напряжений броневого трансформатора, работающего параллельно с ним.

Потоки третьей гармоники стержневого трансформатора, замыкаясь через воздух и конструктивные части, как то: болты, накладки, стенки бака и т. д., индуктируют токи Фуко, которые вызывают иногда заметный нагрев этих частей.

§ 72. Вопросы для самопроверки.

1. Как проявляет себя третья гармоника намагничивающего тока в трехфазной системе, состоящей из трех однофазных трансформаторов?

2. Как проявляет себя третья гармоника намагничивающего тока в трехфазном трансформаторе?

3. Что такое добавочный магнитный поток и чем он ослабляется?

ГЛАВА СЕМНАДЦАТАЯ.

ОСОБЕННОСТИ СОЕДИНЕНИЙ ОБМОТОК ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ.

То или иное соединение первичных или вторичных обмоток трехфазного трансформатора диктуется производственными и эксплоатационными требованиями, предъявляемыми к трансформатору. Эти требования сводятся в основном к следующим: 1) наименьшая стоимость трансформатора, 2) наименьший объем, 3) бóльшая стойкость напряжения при несимметричной нагрузке.

Ниже рассматриваем некоторые возможные соединения трехфазных трансформаторов.

§ 73. Схема соединений обмоток.

А. Соединение звезда — звезда. При соединении первичных и вторичных обмоток звездою ток в обмотках равен линейному току; напряжение же каждой фазы в $\sqrt{3}$ раз меньше линейного напряжения. Последнее обстоятельство имеет следствием то, что изоляция обмоток может быть взята с учетом только лишь фазного напряжения, а число витков фазы может быть взято в $\sqrt{3}$ раз меньше, чем это требовалось бы при соединении треугольником. Таким образом трансформатор с соединением обмоток звезда — звезда является наиболее дешевым. В эксплоатационном же отношении трансформатор с соединением звезда — звезда имеет существенные недостатки. Одним из недостатков его является необеспеченность в отношении симметрии напряжений при несимметричной нагрузке. Если первичная обмотка имеет нейтральный провод, соединенный с генератором (рис. 146а), то нагрузка одной фазы

почти не вызывает нарушений симметрии трансформатора. В самом деле, в рассматриваемом случае токи идут только по обмоткам одного стержня, причем ампервитки вторичной обмотки целиком компенсируются ампервитками первичной обмотки, т. е. $I_2 w_2 \simeq I_1 w_1$. Нарушения магнитного состояния трансформатора почти не получается. Если бы мы привели вторичную обмотку к первичной, т. е. положили $w_2 = w_1$, то токи в соответствующих фазах (на рис. 146a в фазах A и a) были бы равны между собою, т. е. $I_1 = I'_2 = I_2 \frac{w_2}{w_1}$. Наличие нейтрального провода со стороны первичной цепи несомненно удорожает систему, а потому такая система почти и не применяется.

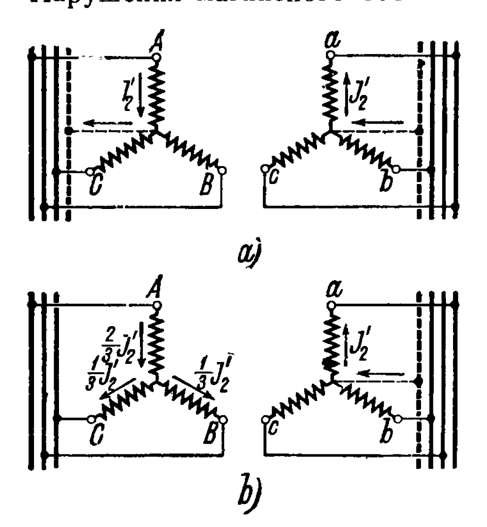


Рис. 146.

Предположим теперь, что нейтральный провод со стороны первичной цепи отброшен. В таком случае при загрузке одной фазы вторичной обмотки (на рис. 146b фазы a) во всех фазах первичной обмотки пойдут токи. В сопряженной фазе первичной обмотки, т. е. в фазе A ток будет равен $\frac{2}{3} I'_2$, а в двух других фазах по $\frac{1}{3} I'_2$. В указанных соотношениях между токами легко убедиться из рассмотрения рис. 147, на котором схематически изображен сердечник трансформатора с первичными катушками и одною вторичною катушкою на среднем стержне. Мы имеем, во-первых, что сумма ампервитков одного окна, т. е. действующих на рис. 147 по пунктирной линии t, должна быть равна нулю; во-вторых, в сопряженной первичной фазе ток вдвое больше тока в двух других первичных фазах (по закону Кирхгофа), в-третьих, направление токов в несопряженных первичных фазах прямо противоположно направлению тока в сопряженной первичной фазе, ибо в первых двух фазах токи идут от концов фаз к началам B и c, а в последней фазе от начала фазы A к концу. Вследствие этого направления токов в сечениях первичных фаз будут такими, какими они показаны на рис. 147. Написав равенство ампервитков для одного окна

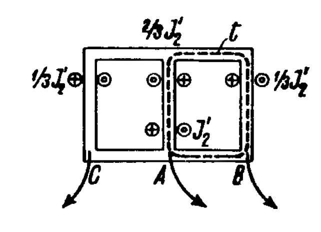


Рис. 147.

$$I'_2 w_1 = I_x \cdot w_1 + \frac{1}{2} I_x w_1,$$

где I_x — ток в сопряженной первичной фазе, получаем, что

$$I_x = \frac{2}{3} I'_2.$$

Из рассмотрения рис. 147 мы видим, что на всех сердечниках нет уравновешенности ампервитков. На крайних стержнях имеются ампервитки первичной обмотки, но нет ампервитков вторичной обмотки. На среднем стержне вторичные ампервитки преобладают над первичными. Если всмотреться в действия неуравновешенных ампервитков, то мы заметим, что во всех стержнях они действуют в одну сторону; на рис. 147 вниз. Это значит, что неуравновешенные ампервитки создадут добавочное магнитное поле, которое во всех стержнях будет направлено в одну сторону и будет замыкаться через воздух (см. рис. 118). Добавочное магнитное поле, меняясь с частотою тока, индуктирует во всех фазах первичной и вторичной обмоток электродвижущие силы одной фазы, которые в первичной обмотке вместе с электродвижущими силами, индуктируемыми главным магнитным потоком, уравновешивают первичное напряжение. Во вторичной обмотке те же электродвижущие силы вместе с электродвижущими силами главного потока дают фазные электродвижущие силы.

Нетрудно показать, что фазные электродвижущие силы в этом случае получаются неравными. Пусть треугольник ABC на рис. 148 представляет треугольник приложенного первичного напряжения, а Δe — электродвижущие силы добавочного магнитного потока. Если бы нулевая точка O треугольника напряжений ABC не сдвинулась со своего места, то фазные электродвижущие силы с первичной стороны должны были определяться векторами OA', OB' и OC'. Этими векторами определялись бы по величине и магнитные потоки в трех стержнях, так как электродвижущие силы пропорциональны вызвавшим их потокам. Магнитные потоки в сердечнике трехфазного трансформатора соединены звездой, а потому к ним приложимо свойство давать в сумме в каждый момент времени нуль, т. е. $\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = 0$. Это значит, что векторы OA', OB' и OC' должны дать замкнутый равносторонний треугольник. Но последние векторы не могут дать замкнутого равностороннего треугольника. Такой треугольник мы получим, если сместим нейтральную точку O в точку O' на расстоянии Δe. В этом случае векторы $O'A'$, $O'B'$, $O'C'$ уже дадут замкнутый равносторонний треугольник. Таким образом в результате добавочного потока нулевая точка обмотки смещается на величину добавочной электродвижущей силы. Последнее явление совершенно подобно тому, что имеет место при холостой работе трансформатора с несимметричною магнитною системою, когда смещение нулевой точки выражалось величиной $\frac{1}{100}$ фазного напряжения. Имея в виду, что полный ток нагрузки больше тока холостой работы раз в 20, то

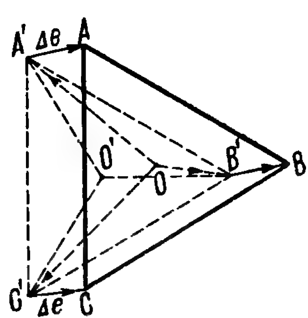
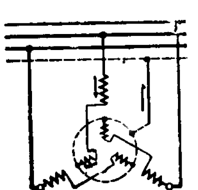


Рис. 148.

при несимметричной нагрузке с полным током смещение нулевой точки выразится $\frac{20}{100}=\frac{1}{5}$ фазного напряжения. Такое большое смещение нулевой точки вызывает большое неравенство в фазных напряжениях, что, конечно, представляет большое неудобство с эксплоатационной точки зрения. В том случае, когда нейтраль первичной звезды не может быть соединена с нейтралью генератора, рассматриваемое соединение не рекомендуется брать при трансформировании тока отдельными однофазными трансформаторами или одним трехфазным трансформатором броневого типа, так как в фазных напряжениях получаются значительные третьи гармоники. Оно не рекомендуется даже и при передачах звезда—звезда на звезда—треугольник при условии заземления нейтралей высокого напряжения, ибо замыкающиеся в этом случае через землю токи третьей гармоники могут причинить большие расстройства в соседних телефонных и телеграфных линиях.



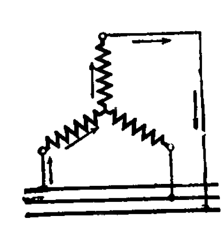


Рис. 149.

При трансформировании трехфазным трансформатором стержневого типа третьи гармоники, как мы видели и ранее, проявляются значительно слабее, а потому соединение звезда—звезда в данном случае будет допустимо. Группа звезда—звезда применяется при небольших распределительных сетях с мало нагруженным вторичным нулевым проводом. При высоких напряжениях эта группа применяется только при наличии третичной обмотки, соединенной треугольником. Эта последняя необходима для прохождения третьей гармоники намагничивающего тока; она же может дать ток для защитных приспособлений в случае короткого замыкания главной обмотки.

B. Звезда—зигзаг. Для того чтобы в соединении обмоток трансформаторов звезда—звезда избавиться в известной мере от добавочного магнитного потока при несимметричной нагрузке применяют соединение вторичных обмоток звезда—зигзаг. Если бы при таком соединении вторичных обмоток имелась во вторичной цепи односторонняя нагрузка, то, как видно из рис. 149, токи проходили бы во вторичной и первичной обмотках двух стержней. Ампервитки первичной обмотки обоих стержней компенсировали бы ампервитки вторичной обмотки тех же стержней и магнитное равновесие не нарушалось бы, т. е. не было бы добавочного однофазного магнитного потока. Следует отметить, что соединение вторичных обмоток зигзагом удорожает трансформатор, так как требует на 15% больше меди, чем соединение просто звездою.

C. Треугольник—треугольник. При соединении первичных и вторичных обмоток трех однофазных трансформаторов или одного трехфазного трансформатора треугольником линейное напряжение равно фазному напряжению, а линейный ток в $\sqrt{3}$ раз больше фазного тока, т. е. $V_л = V_ф$ и $I_л = \sqrt{3}\, I_ф$. Таким образом каждый

трансформатор должен быть намотан на полное линейное напряжение, но для тока, составляющего 58% от линейного. Так как обмотки находятся под полным линейным напряжением, а не под фазным, как у трансформатора с обмотками, соединенными звездою, то изоляция их должна быть относительно более совершенной. Вследствие этого стоимость трансформатора с обмотками треугольник — треугольник более высокая, чем аналогичного трансформатора с обмотками звезда—звезда.

Несимметричная нагрузка трансформатора с обмотками треугольник—треугольник не дает добавочных магнитных потоков, как у трансформатора с обмотками звезда—звезда. В самом деле, если бы нагрузка вторичной цепи была односторонняя, то токи проходили бы во всех фазах первичной и вторичной обмоток, как это указано на рис. 126. Вследствие этого ампервитки первичной и вторичной фаз одного и того же стержня уравновесятся, и однофазного и добавочного магнитного потока не будет.

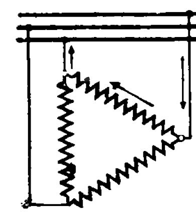
Соединение треугольник — треугольник дает возможность не прерывать работы линии при порче одной из фаз, если трансформирование происходит помощью трех однофазных или одного броневого трехфазного трансформатора. В этих случаях просто отключают пострадавший трансформатор или пострадавшую обмотку, не отключая двух других от линии. При трансформировании тока трехфазным броневым трансформатором обмотки пострадавшей фазы замыкают накоротко, предварительно отключив их от обмоток двух других фаз. Последнее необходимо для того, чтобы токи короткого замыкания в них уничтожили часть магнитного потока двух других фаз, замыкающихся через сердечник пострадавшей фазы, чтобы не было, следовательно, высокого напряжения в пострадавших обмотках. При трансформировании тока одним стержневым трехфазным трансформатором изолировать пострадавшую фазу нельзя, так как магнитная цепь у всех фаз общая.

С выходом фазы из работы система двух закрытых треугольников превращается в систему двух открытых треугольников, вследствие чего отдаваемая мощность должна быть понижена до 58% общей мощности трех трансформаторов (или одного трехфазного трансформатора).

D. Треугольник — звезда; звезда — треугольник. Первое соединение обмоток, треугольник—звезда, является обычным у повысительных трансформаторов высокого напряжения и распределительных трансформаторов низкого напряжения при четырехпроводной системе; второе соединение обмоток, звезда—треугольник,—у понизительных трансформаторов подстанции.

Токи и напряжения обмоток, соединенных треугольником, находятся в тех же отношениях к линейному току и напряжению, как и у рассмотренного соединения. Ток в обмотках, соединенных звездою, равен линейному току, а напряжение обмоток в $\sqrt{3}$ раз меньше линейного напряжения, т. е. $I_ф = I_л$ и $V_ф = \frac{V_л}{\sqrt{3}} = 0{,}58 V_л$.
Таким образом, если нейтраль звезды заземлена, то напряжение, действующее на изоляцию обмотки и линии, будет составлять всего

58% от линейного напряжения; на это напряжение и нужно рассчитывать изоляцию линии. Если же нейтраль не заземлена, то изоляцию обмоток следует рассчитывать на полное напряжение, ибо при заземлении линии изоляция подвергается действию полного линейного напряжения. Необходимо заметить, что и при заземленной нейтрали изоляция может подвергнуться действию напряжения, большего, чем фазное, если заземление нейтрали осуществляется через сопротивление.



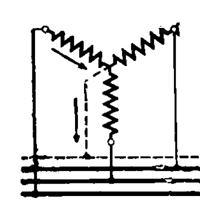


Рис. 150.

Трансформатор с обмотками, соединенными в треугольник — звезда или звезда — треугольник мало чувствителен к несимметричным нагрузкам. В самом деле, если бы при первичной обмотке, соединенной треугольником, и вторичной обмотке, соединенной звездою с нейтральным проводом, имелась односторонняя нагрузка, то токи проходили бы только через соединенные обмотки одного стержня (рис. 150). Это значит, что магнитное равновесие не было бы нарушено ни на этом стержне, ни на двух других: добавочного потока не было бы. Если бы вторичная цепь не имела нейтрального провода, то при односторонней нагрузке токи проходили бы в двух соединенных фазах. И в этом случае на всех стержнях имелось бы магнитное равновесие, и добавочный магнитный поток отсутствовал бы. Вследствие этого не происходило бы смещения нейтральной точки и не было бы заметной асимметрии фазных напряжений.

Последнее обстоятельство служит причиною тому, что трансформаторы с обмотками треугольник — звезда особенно охотно применяют в распределительных сетях (например осветительных). Следует отметить, однако, что порча одного трансформатора или одной фазы трехфазного трансформатора выводит из действия группу треугольник — звезда, так как со стороны вторичной цепи нельзя получить симметричной системы (рис. 151, верхняя группа). Группа звезда — треугольник при той же порче дает возможность работать с мощностью, составляющей 58% от нормальной мощности, при условии, что нейтраль звезды трансформатора будет соединена, например, путем заземления с нейтралью генератора (рис. 150, нижняя группа). Нетрудно видеть, что передача, в которой отправительный трансформатор включен треугольником — звездою с заземленной нейтралью, а приемный трансформатор звездой — треугольником также с заземленной нейтралью, может работать при порче одной фазы у приемного трансформатора. Группа — треугольник у высшего напряжения и звезда у низшего напряжения — применяется в больших распределительных трансформаторах с нагруженным полностью нулевым проводом. Группа — звезда у высшего напряжения и треугольник у низшего напряжения — применяется в главных трансформаторах больших силовых станций и подстанций, не служащих для распределения.

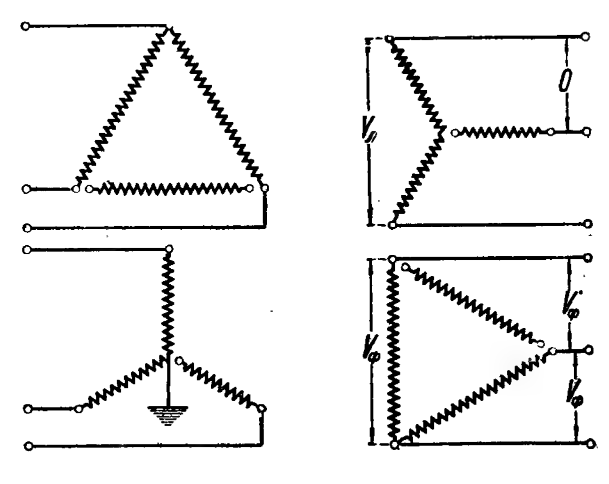


Рис. 151.

§ 74. Сопоставление схем соединений обмоток трансформаторов.

Из краткого рассмотрения особенностей соединения первичных и вторичных обмоток при трансформировании трехфазного тока ясно, что не все комбинации одинаково приемлемы при передаче энергии. Не входя в более подробное сравнение рассмотренных комбинаций соединений, можно ограничиться нижеследующей таблицей 10, в которой указаны места, занимаемые той или иной комбинацией передачи энергии в отношении стоимости, удобства эксплоатации и наименьшего напряжения. В этой таблице стоимость относится к трансформаторам одинаковой мощности и при одинаковом первичном напряжении. Само собою разумеется, стоимости относятся к какой-либо одной системе трансформирования: при помощи трех однофазных трансформаторов или одного трехфазного (стоимость одного трехфазного трансформатора всегда меньше трех однофазных трансформаторов той же общей мощности, ибо первый весит приблизительно на 16% меньше, нежели три однофазных; на столько же меньше у него и потери).

Под удобством эксплоатации подразумевается гибкость системы в отношении исключения из работы отдельных фазных обмоток при их порче без длительного перерыва в подаче тока в линию, причем подразумевается, что звезда — звезда заземлена и что генератор, соединенный звездою, также заземлен. Под наименьшим напряжением подразумевается то наименьшее напряжение, которое можно получить как в линии, так и во вторичной цепи без особых сложных переключений.

ТАБЛИЦА 10.

Предмет сравнения	Звезда — треугольник на треугольник — звезда	Звезда—звезда на звезда — звезда	Треугольник — треугольник на треугольник—треугольник	Треугольник—звезда на звезда — треугольник
1. Наименьшая стоимость	3-е место	1-е место	4-е место	2-е место
2. Удобство эксплоатации	3-е место	4-е место	1-е место	2-е место
3. Наименьшее напряжение	4-е место	3-е место	2-е место	1-е место

Из сравнения систем передачи следует, что наилучшею является система треугольник — звезда на звезда — треугольник. Эта система чаще других и встречается среди высоковольтных передач Америки.

Согласно общесоюзному стандарту ОСТ 4815 в СССР изготовляются трехфазные масляные транформаторы с естественным охлаждением, работающие как понижающие трансформаторы, с соединением обмоток звезда — звезда и звезда — треугольник.

Первое соединение, являющееся наиболее экономичным в отношении веса меди, рекомендуется для применения в четырехпроводных распределительных сетях (осветительных), а второе соединение рекомендуется для применения в трехпроводных сетях.

В таблице 11, кроме схем (два первых столбца), указаны векторные диаграммы (3-й и 4-й столбцы), а также условные обозначения схем (последний столбец). В условных обозначениях первый значок относится к обмотке высшего напряжения, второй значок — к обмотке низшего напряжения, а число 11 или 12 указывает на угловое смещение векторов первичной и вторичной обмоток (одной и той же фазы), причем за единицу смещения принято 30°. Например у трансформатора $Y/Y_0 — 12$ угловое смещение между соответствующими векторами равно $12 \cdot 30 = 360°$, т. е. это смещение равно нулю (см. векторные диаграммы в третьем и четвертом столбцах).

ТАБЛИЦА 11.

Схема соединения обмоток		Диаграмма векторов		Условное обозначение
Высшее напряжение	Низшее напряжение	Высшее напряжение	Низшее напряжение	
A B C / X Y Z	c b a 0 / x y z	B, A, C	b, a, c	$Y/Y_0 — 12$
A B C / X Y Z	c b a / x y z	B, A, C	b, c, a	$Y/\Delta — 11$
Смотреть со стороны выводов обмотки высшего напряжения	Смотреть со стороны выводов обмотки низшего напряжения			

§ 75. Вопросы для самопроверки.

1. Каковы особенности трансформаторов, с соединением обмоток: a) звезда — звезда, b) звезда — зигзаг, c) треугольник — треугольник?

2. Каковы относительные преимущества указанных в п. 1 трансформаторов?

ГЛАВА ВОСЕМНАДЦАТАЯ

ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРОВ.

§ 76. Параллельное включение однофазных трансформаторов.

Под параллельным включением трасформаторов подразумевается такое включение, при котором первичные обмотки их соединены с общими первичными распределительными шинами, а вторичные обмотки соединены с общими вторичными шинами. Трансформаторы, предназначенные для параллельной работы, должны удовлетворять ряду условий. Некоторые из этих условий необходимы для удовлетворительной холостой работы, другие необходимы для удовлетворительной работы трансформаторов при нагрузке.

Условия, необходимые для холостой работы или для параллельного включения трансформаторов, следующие: 1) равенство вторичных напряжений при холостой работе и 2) нулевое смещение по фазе между вторичными напряжениями отдельных трансформаторов.

Рассмотрим сначала эти условия в применении к параллельному включению однофазных трансформаторов.

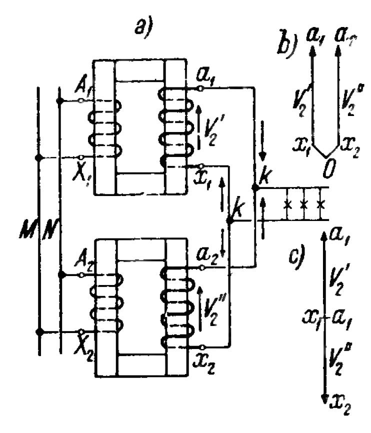


Рис. 152.

Предположим, что имеются два однофазных трансформатора с первичными и вторичными обмотками, навитыми в одну сторону, например по часовой стрелке (рис. 152). Если мы начала A_1 и A_2 первичных обмоток соединим с одной первичной шиной N, а концы X_1 и X_2 — с другой первичной шиной M, то начала a_1 и a_2 вторичных обмоток были бы одинаковой полярности в любой момент времени, так как эти полярности совпадают с полярностями начал A_1 и A_2 первичных обмоток, а эти начала соединены с одной и той же шиной, т. е. имеют одну полярность. То же самое можно сказать и про концы x_1 и x_2 вторичных обмоток: они будут иметь одинаковую полярность, но противоположную полярности начал a_1 и a_2.

Соединим теперь однополярные концы вторичных обмоток x_1 и x_2 металлически друг с другом. Если бы напряжения вторичных обмоток были одинаковы, то потенциалы начал вторичных обмоток a_1 и a_2 были бы также одноименны по знаку и одинаковы по величине, и векторы вторичных обмоток имели бы одинаковое направление (рис. 152b). Это значит, что в рассматриваемом случае между вторичными напряжениями смещения по фазе не будет; вследствие

этого мы можем соединить между собою металлически начала a_1 и a_2. Так как напряжения в цепи, состоящей из вторичных обмоток, направлены друг против друга и они взаимно равны, то в обмотках никакого уравнительного тока не появится. Следовательно оба трансформатора действительно будут работать вхолостую. Но если бы напряжения вторичных обмоток не были равны между собою, например $V_2' > V_2''$, то в цепи вторичных обмоток проходил бы уравнительный ток

$$I_y = \frac{V'_2 - V''_2}{z'_2 + z''_2},$$

где z'_2 и z''_2 — полные сопротивления вторичных обмоток.

Следовательно в этом случае трансформаторы не работали бы вхолостую. При значительной разнице вторичных напряжений вторичные обмотки могли бы пострадать от излишнего нагрева их уравнительным током.

Соединим теперь между собою конец x_1 первой вторичной обмотки с началом a_2 второй вторичной обмотки. В таком случае свободные начало a_1 и конец x_2 будут иметь разноименные потенциалы, и если бы мы соединили их с вольтметром, то обнаружили бы на них удвоенное вторичное напряжение, т. е. $2V_2'$. В этом случае векторы вторичных напряжений имели бы взаимно противоположные направления (рис. 152c). Следовательно, смещение по фазе между вторичными напряжениями было бы в 180°. Соединять металлически между собою свободные начало a_1 и конец x_2 нельзя, ибо в обмотках пройдет слишком большой уравнительный ток.

При наличии у трансформаторов заводских обозначений концов обмоток необходимо к первичным шинам подводить одноименные концы первичных обмоток и ко вторичным шинам подводить одноименные концы вторичных обмоток.

Чтобы исключить неприятные последствия ошибочных соединений, рекомендуется после соединения двух концов вторичной обмотки измерить вольтметром напряжение между двумя оставшимися свободными концами. Если это напряжение равно нулю, то свободные концы соединять друг с другом можно; если же оно вдвое больше нормального вторичного напряжения, то соединять концы между собою нельзя. Вместо вольтметра можно использовать лампочку накаливания; перекал лампочки сигнализирует о неправильном соединении концов вторичных обмоток.

Следует заметить, что пересоединение концов первичной обмотки у первичных шин влечет за собою изменение полярностей концов вторичной обмотки. Поэтому, если бы оказалось, что со стороны вторичной свободные концы не имеют одинаковой полярности, то можно, оставив соединение вторичных обмоток нетронутым, пересоединить концы первичной обмотки одного трансформатора. В таком случае свободные концы вторичных обмоток окажутся одной полярности.

§ 77. Параллельное включение трехфазных трансформаторов.

Трехфазные трансформаторы, предназначенные для параллельного включения, должны удовлетворять тем же условиям, что и однофазные, а именно: 1) вторичные линейные напряжения должны быть одинаковы, 2) между соответствующими фазными напряжениями угол смещения должен быть равен нулю. Оба условия сводятся к одному: металлически между собою можно соединять только те концы вторичных обмоток, которые имеют одинаковый потенциал по полярности и по величине в любой момент времени.

У трехфазных трансформаторов однопотенциальные концы вторичных обмоток находятся также по потенциальным диаграммам. Если, например, первичные и вторичные обмотки намотаны в одном и том же направлении и к первичной сети подключены концы первичных обмоток $A_1B_1C_1$ и $A_2B_2C_2$ (рис. 153), причем другие концы связаны между собою в нейтраль, то потенциальные диаграммы для первичных обмоток изобразятся векторами OA_1, OB_1, OC_1 и OA_2, OB_2, OC_2. Так как потенциалы концов первичных обмоток задаются сетью, то диаграммы $A_1B_1C_1$ и $A_2B_2C_2$, очевидно, должны перекрывать друг друга.

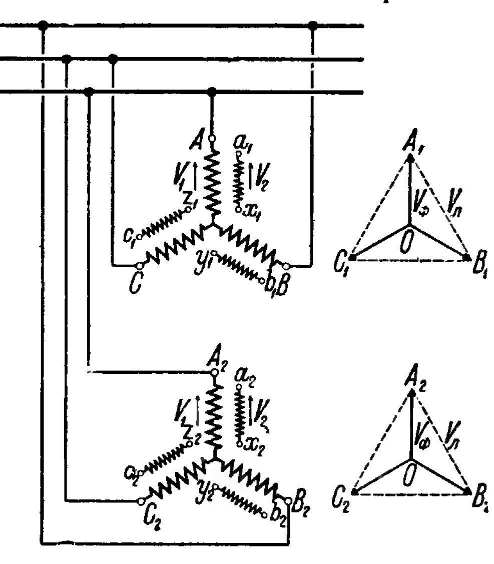


Рис. 153.

Относительное положение и вид потенциальных диаграмм вторичных цепей зависит от порядка соединения отдельных обмоток. Если соединить между собою у первого трансформатора концы вторичных обмоток x_1, y_1, z_1 и у второго трансформатора концы x_2, y_2, z_2, то получатся потенциальные диаграммы, изображенные на рис. 154. При построении потенциальных диаграмм вторичных соединений всегда нужно помнить, что векторы вторичных электродвижущих сил параллельны соответствующим векторам первичных электродвижущих сил, ибо первичная и вторичная обмотки, наложенные на один стержень, пронизываются одним и тем же агнитным потоком. Вращая вокруг точек O_1 и O_2 линии времени, легко видеть, что начала a_1a_2, b_1b_2, c_1c_2 имеют в один и тот же момент времени соответственно одинаковый потенциал; смещение по фазе фазных вторичных напряжений V'_2 и V''_2 равно нулю. Поэтому концы a_1a_2, a_2b_2 и c_1c_2 можно связать между собою металлически.

Ради наглядности на рис. 155 изображены волны первичных и вторичных напряжений для расматриваемого соединения первичных и вторичных обмоток двух рансформаторов I и II звездою.

Волны напряжений нанесены со сдвигом во времени на $\frac{1}{3}$ периода, причем на рис. 155 расстояние между шинами *1, 2, 3* взято равным расстоянию, соответствующему одной трети периода. Из рисунка видно, что волны вторичных напряжений, отходящих от одноименных зажимов вторичных обмоток, совпадают. Это значит, что в какой-либо момент времени t потенциалы одноименных концов одинаковы.

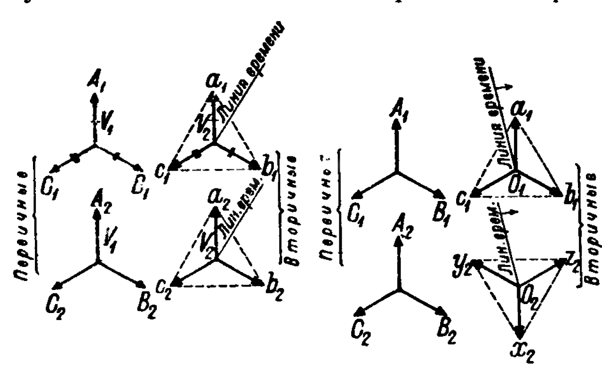


Рис. 154a. Рис. 154b.

Соединим теперь между собою у первого трансформатора концы x_1, y_1, z_1, а у второго трансформатора начала a_2, b_2, c_2; тогда потенциальные диаграммы будут иметь вид рис. 154b, т. е. первая диаграмма останется без изменения — потенциалы концов первой вторичной обмотки будут совпадать с потенциалами сети, тогда как вторая диаграмма повернется на 180°, ибо на свободных концах какой-либо фазы второй вторичной обмотки потенциал будет, например, отрицательным в тот момент, когда на свободном конце соответствующей фазы первой вторичной обмотки потенциал положительный. Вращая вокруг точек O_1 и O_2 линии времени, мы замечаем, что в данном случае нет такой пары зажимов, у которых потенциалы были бы равны в один и тот же момент времени. Следовательно осуществить параллельное соединение вторичных обмоток не представляется возможным. Это и понятно: линейные напряжения первой обмотки дают треугольник a_1 b_1 c_1, второй — треугольник x_2 y_2 z_2, повернутый относительно первого на 180°.

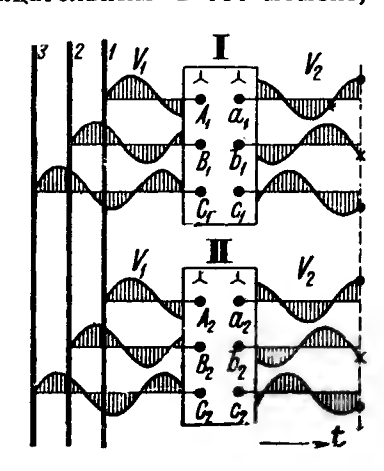


Рис. 155.

Чтобы иметь возможность и в этом последнем случае осуществить параллельное соединение вторичных обмоток, необходимо пересоединить концы первичной обмотки какого-либо трансформатора, т. е. свободные концы соединить в нейтраль, а освободившиеся концы подвести к шинам. В этом случае потенциальная диаграмма первичной обмотки не изменится, так как потенциалы концов ее попрежнему будут задаваться шинами, но потенциальная диаграмма вторичной обмотки повернется на 180° и будет совпадать с потенциальною диаграммою другого трансформатора. В самом деле, при обмене концами первичной обмотки

токи в ней будут итти в противоположном направлении, и магнитные потоки будут пронизывать вторичную обмотку также в противоположном направлении, а это значит, что векторы электродвижущих сил ее повернутся на 180°.

Соединяя вторичные обмотки треугольником, мы можем получить потенциальные диаграммы рис. 156. Первые диаграммы получатся, когда у обеих вторичных обмоток будут соединены: начало первой фазы с концом второй, начало второй фазы с концом третьей и начало третьей фазы с концом первой. Вторые диаграммы получатся, когда у первой вторичной обмотки соединение останется прежним, а у второй будут соединены: начало первой фазы с концом третьей, начало третьей фазы с концом второй и начало второй фазы с концом первой. Нетрудно видеть, что только в первой комбинации имеются зажимы с одинаковыми потенциалами в один и тот же момент времени. Во второй комбинации таких зажимов не имеется, и потому вторичные обмотки не могут быть соединены параллельно.

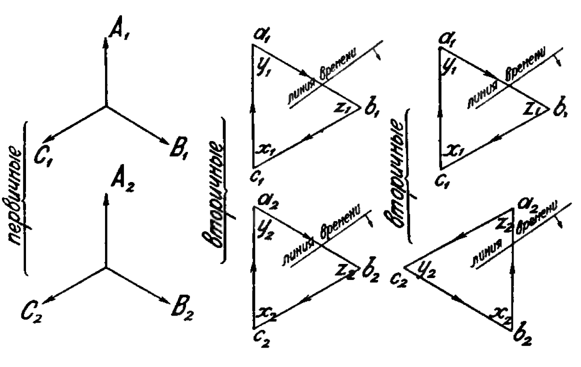


Рис. 156.

Но если концы первичной обмотки какого-либо трансформатора переключить, т. е. свободные концы соединить в нейтраль, а освободившиеся соединить с шинами, то параллельное соединение вторичных обмоток будет уже возможно, так как с переключением первичной обмотки одного трансформатора потенциальная диаграмма вторичной его обмотки повернется на 180°. С помощью потенциальных диаграмм можно было бы показать, что параллельное соединение трехфазных трансформаторов с обмотками, соединенными звезда — звезда и звезда — треугольник, невозможно. В верхней части рис. 157 изображены потенциальные диаграммы вторичных напряжений обоих трансформаторов, а в нижней части того же рисунка изображены волны первичных напряжений. Из рисунка ясно видно, что потенциальные диаграммы вторичных напряжений не перекрывают друг друга, или волны вторичных напряжений, отходящие от одноименных вторичных зажимов, не совпадают друг с другом. Это значит, что в какой-либо момент времени t потенциалы одноименных концов неодинаковы.

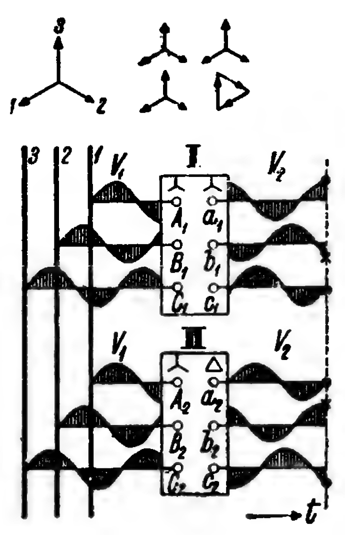


Рис. 157.

ТАБЛИЦА 12.

Обозначения групп соединений				Диаграммы векторов		Схема соединений	
				Высшее напряжение	Низшее напряжение	Высшее напряжение	Низшее напряжение
12	α	Δ/Δ — 12	0°				
	β	Y/Y — 12 нормальн.					
	γ	Δ/Z — 12					
6	α	Δ/Δ — 6	180°				
	β	Y/Y — 6					
	γ	Δ/Z — 6					
5	α	Δ/Y — 5	150°				
	β	Y/Δ — 5					
	γ	Δ/Z — 5					
11	α	Δ/Y — 11 нормальн.	330°				
	β	Y/Δ — 11 нормальн.					
	γ	Y/Z — 11 нормальн.					

В тех случаях, когда способ намотки обмоток неизвестен, однопотенциальные зажимы приходится отыскивать опытным путем. Соединяют между собою наугад какие-либо два зажима вторичных обмоток и вольтметром высокого напряжения отыскивают такие два зажима, между которыми напряжение равно нулю. При

неудаче соединяют два каких-либо зажима обмоток и снова ищут пару однопотенциальных зажимов. Если при всевозможных комбинациях не удается найти три пары однопотенциальных зажимов, то следует изменить соединение какой-либо вторичной или первичной обмотки на обратное, т. е. „перевернуть“ на 180° потенциальную диаграмму соединения. Если и после этого не удастся отыскать однопотенциальные зажимы, то, очевидно, параллельно соединять данные трансформаторы вообще невозможно.

Чтобы облегчить установку трехфазных трансформаторов и получить большую гарантию в правильности соединения их, „Правила и нормы для испытания трансформаторов“, одобренные IX ВЭС, рекомендуют заводам совершенно определенным образом обозначать выведенные наружу концы первичных и вторичных обмоток и указывать, к какой установленной нормами группе относится трансформатор.

В таблице 12 приведены схемы соединений обмоток трехфазных трансформаторов, которые, в соответствии с нормами IX ВЭС, применялись в СССР до введения общесоюзного стандарта ОСТ 4815.

Как видно из таблицы, трансформаторы по способу соединения обмоток, разбиваются на четыре группы: 12, 6, 5 и 11. У трансформаторов группы 12 первичные и вторичные напряжения совпадают по фазе; другими словами, угол смещения между векторами соответствующих первичных и вторичных напряжений равен нулю. Такое угловое смещение векторов напряжений соответствует угловому смещению стрелок часов в 12 часов дня. Отсюда и происходит условное обозначение первой группы числом 12. У трансформаторов группы 6 векторы соответствующих первичных и вторичных напряжений расходятся по фазе на угол 180°. Такое расхождение между векторами соответствует расхождению стрелок часов в 6 часов; отсюда происходит условное обозначение второй группы числом 6. У трансформаторов группы 5 векторы первичных и вторичных напряжений расходятся на угол 150°, что соответствует расхождению стрелок часов в 5 часов; отсюда происходит обозначение этой группы числом 5. Наконец, у трансформаторов группы 11 векторы первичных и вторичных напряжений расходятся на угол 330°, что соответствует расхождению стрелок часов в 11 часов; отсюда и происходит условное обозначение группы числом 11.

Соединение обмоток в звезду обозначается буквою Y, соединение обмоток в треугольник — буквою Δ, соединение обмоток в зигзаг — буквою Z. Над чертой помещается буква, обозначающая соединение обмоток высшего напряжения, под чертою — соединение обмоток низшего напряжения. Буквенные обозначения в схемах соединений указаны в том порядке, в каком они представляются наблюдателю, стоящему перед трансформатором со стороны соответствующего напряжения.

Параллельно можно соединить трансформаторы одной группы простым соединением одноименных зажимов. Трансформаторы групп 12 и 6 могут быть соединены параллельно после соответствующих изменений внутренних соединений первичной или вто-

ричной обмотки, т. е. взаимным обменом начала и конца каждой фазы. Если, например, вторичная обмотка первого трансформатора группы 6 была соединена в порядке $ay-bz-cx$, то для того, чтобы потенциальный треугольник повернулся на 180°, необходимо соединить вторичную обмотку в порядке $az-cy-bx$.

Трансформаторы группы 5 могут быть параллельно соединены с трансформаторами группы 11 или после внутренних пересоединений, или же, при условии соединения зажимов трансформаторов с собирательными шинами, в порядке, указанном в таблице 13.

ТАБЛИЦА 13

Собирательные шины	1	2	3	1	2	3
	Высшее напряжение			Низшее напряжение		
Группа 5 α, β, γ	*A*	*B*	*C*	*a*	*b*	*c*
Группа 11 α, β, γ	*A*	*C*	*B*	*c*	*b*	*a*
	C	*B*	*A*	*b*	*a*	*c*
	B	*A*	*C*	*a*	*c*	*b*

Чтобы уяснить себе последние соединения, предположим, что требуется включить параллельно трансформатор группы 5 с трансформатором группы 11. На рис. 158 изображены векторные диаграммы для трансформаторов 5α (группа C_1) и 11α (группа D_1).

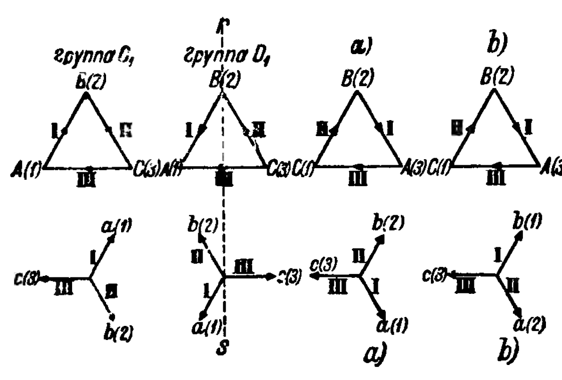


Рис. 158.

Согласно 3-й строке таблицы 13 у трансформатора группы 11 меняются местами зажимы *C* и *A*: зажим *C* присоединяется к шине *1*, а зажим *A* — к шине *3*. Вследствие этого векторные диаграммы первичной и вторичной обмоток повернутся около вертикали *rs* на 180° и представятся рис. 158a. Если теперь у вторичной обмотки зажим *b* соединить с шиною *1*, а зажим *a* соединить с шиною *2*, то вторичные обмотки трансформаторов 11α и 5α окажутся в параллельном соединении: потенциалы концов вторичных обмоток, присоединенных к одним и тем же шинам, будут одноименны.

§ 78. Параллельная работа трансформаторов под нагрузкою.

Трансформаторы, предназначенные для параллельной работы со стороны вторичных обмоток под нагрузкою, должны иметь,

кроме одинаковых вторичных напряжений при холостой работе, еще одинаковые падения напряжений при токах, пропорциональных их номинальным мощностям. Если, например, мощность одного трансформатора равна 1, а другого в пять раз больше, т. е. равняется 5, то падения напряжения должны быть одинаковы при токах: I — для первого трансформатора и $5\,I$ — для второго. Только при этом условии внешняя нагрузка распределится между трансформаторами пропорционально их номинальным мощностям.

Для выполнения этого условия

у трансформаторов, предназначенных для параллельной работы, должны быть равны треугольники короткого замыкания при номинальном для каждого токе, или же должны быть равны напряжения короткого замыкания при номинальном для каждого токе.

Необходимость равенства напряжений короткого замыкания при номинальных токах трансформаторов вытекает из потенциальной диаграммы двух параллельно работающих трансформаторов, изображенной на рис. 159. Так как первичные обмотки трансформаторов между собою соединены металлически, точно так же соединены металлически и вторичные обмотки, то при любой нагрузке первичное напряжение V_1 является общим для первичных обмоток и вторичное напряжение V_2 является общим для вторичных обмоток обоих трансформаторов. Но на потенциальной диаграмме векторы первичных и вторичных напряжений связаны общим вектором V_{1k}, равным полному падению напряжения в трансформаторах. Это значит, что полные падения напряжения в трансформаторах должны быть одинаковы, т. е.

$$V_{1k} = I_1' \, z_k' = I_1'' \, z_k'',$$

Рис. 159.

где I_1' и I_1'' — токи трансформаторов, а z_k' и z_k'' — полные сопротивления короткого замыкания трансформаторов.

Из последнего равенства следует

$$\frac{I_1'}{I_1''} = \frac{z_k'}{z_k''},$$

т. е. общий ток нагрузки распределяется между трансформаторами так, что токи их будут находиться в обратном отношении полных сопротивлений короткого замыкания. Если это отношение суще-

ствует при номинальных для каждого из трансформаторов токах, т. е. существует соотношение

$$\frac{I'_{2н}}{I''_{1н}} = \frac{z'_k}{z''_k},$$

то и при любой нагрузке токи в трансформаторах будут находиться в таком же соотношении, как и при номинальной нагрузке. В этом случае один трансформатор не перегрузится за счет другого.

Равенство напряжений короткого замыкания при номинальных токах не является исчерпывающим условием для хорошей параллельной работы трансформаторов. С точки зрения наименьших потерь в трансформаторах желательно, чтобы были равны и треугольники коротких замыканий при номинальных токах. Только при этом условии общий ток нагрузки будет равен алгебраической (а не геометрической) сумме токов отдельных трансформаторов. В последнем нетрудно убедиться из потенциальной диаграммы рис. 159, на которой иллюстрирован случай неравенства треугольников короткого замыкания, *abc* — для одного трансформатора и *abd* — для другого трансформатора. Это неравенство треугольников короткого замыкания при номинальных токах имеет место в том случае, когда неравны друг другу в отдельности падения напряжения в активных сопротивлениях, т. е.

$$I'_{1н}R'_k \gtrless I''_{1н}R''_н$$

и в реактивных сопротивлениях

$$I'_{1н}x'_k \gtrless I''_{1н}x''_k;$$

другими словами, когда отношение реактивного сопротивления к активному сопротивлению трансформаторов не равны друг другу, т. е.

$$x'_k : R'_k \gtrless x'_k : R''_k.$$

Последнее неравенство равносильно неравенству углов сдвига токов короткого замыкания относительно напряжений короткого замыкания, т. е. $\varphi'_k \gtrless \varphi''_k$, так как $x_k : R_k = \operatorname{tg}\varphi_k$. Итак,

если отношение сопротивлений $\frac{x_k}{R_k}$ у параллельно работающих трансформаторов одно и то же, то их токи совпадут по фазе друг с другом и с общим током нагрузки.

В этом случае общий ток нагрузки будет равен алгебраической сумме токов всех трансформаторов. Если отношение $\frac{x_k}{R_k}$ у параллельно работающих трансформаторов неодинаково, то токи их сдвинуты на разные углы относительно напряжения, и общий ток нагрузки будет определяться геометрической суммой токов всех трансформаторов. При двух трансформаторах общий ток нагрузки

в этом случае может быть определен равенством получаемым из диаграммы рис. 159:

$$I^2 = I_1'^2 + I_1''^2 + 2I'_1\,I''_1\cos(\varphi''_k - \varphi'_k).$$

Зная напряжение короткого замыкания трансформатора $V'_{kн}$ и $V''_{kн}$ при нормальных токах $I'_{2н}$ и $I''_{1н}$ и углы сдвига токов короткого замыкания φ'_k и φ''_k (величины, определяемые опытом короткого замыкания), можно найти отношение между полными сопротивлениями трансформаторов, т. е. отношение $\frac{z'_k}{z''_k}$, а следовательно, и отношение токов $\frac{I'_1}{I''_1}$. Это последнее отношение и выше написанное равенство дают возможность найти при заданном общем токе I распределение его между трансформаторами.

Если речь идет о трансформаторах одинаковой мощности, но разных фирм, а следовательно, с разными внутренними сопротивлениями, то для разрешения поставленной выше задачи достаточно знать только напряжения короткого замыкания при нормальных токах, так как отношение $\frac{z'_k}{z''_k}$ равно отношению $\frac{V'_{kн}}{V''_{kн}}$, ибо токи короткого замыкания в этом случае равны между собою.

Необходимо заметить, что если у трансформаторов одинаковой мощности общие сопротивления z_k равны, но общие активные и реактивные их сопротивления R_k и x_k соответственно не равны друг другу, то хотя в этом случае токи их равны (ибо $I'_1 : I''_1 = z''_k : z'_k$), мощности их не одинаковы, так как токи трансформаторов по фазе совпадать не будут.

Равенства треугольников короткого замыкания при номинальных токах от параллельно работающих трансформаторов требовать почти невозможно. Довольно трудно требовать и строгого равенства напряжений короткого замыкания при номинальных токах, в особенности от трансформаторов, резко отличающихся по мощности, и в частности разных заводов, ибо условия проектирования требуют неодинаковых напряжений короткого замыкания у трансформаторов с одним и тем же коэфициентом трансформации, но разных мощностей.

Поэтому считается достаточным, если напряжения короткого замыкания трансформаторов, предназначенных для параллельной работы, будут отличаться на $\pm 10\%$ от их средних значений для трансформаторов того же типа. Желательно при этом, чтобы меньший трансформатор имел большее напряжение короткого замыкания во избежание его перегрузки.

В том случае, когда трансформаторы работают параллельно не от одних и тех же шин, а присоединены к разным, иногда довольно отдаленным точкам линии, разница в величинах напряжений короткого замыкания может быть допущена и больше указанной выше. Если бы напряжения короткого замыкания трансформаторов, предназначенных для параллельной работы, отличались на большую указанной выше величину, то последовательно с трансформатором с меньшим напряжением короткого замыкания

можно было бы включить реактивную катушку с подходящим реактивным сопротивлением или, в крайнем случае, активное сопротивление. Вообще рекомендуется, чтобы нормальные мощности параллельно работающих трансформаторов относились друг к другу не более, как 3:1 и даже 2:1.

Для трансформаторов, изготовляемых на заводах СССР, Общесоюзный стандарт (ОСТ 4815) рекомендует значения напряжения короткого замыкания в процентах от номинальных напряжений той же обмотки, приведенные в таблице 14.

ТАБЛИЦА 14.

Напряжения короткого замыкания трансформаторов.

Номинальное напряжение обмотки высшего напряжения kV		Номинальные мощности kVA		Напряжение короткого замыкания %
понижающие трансформаторы	повышающие трансформаторы	трехфазные трансформаторы	однофазные трансформаторы	
3	—	5— 1 800	—	5,5
6	—	5— 5 600	—	5,5
6,3	—	7 500—10 000	—	10
10	—	5— 5 600	—	5,5
10,5	—	7 500—10 000	5 000	10
15	—	7 500—15 000	5 000	10
35	—	20— 1 800	—	6,5
35	38,5	3 200	—	7
35	38,5	5 600—10 000	—	7,5
35	38,5	15 000—31 500	5 000—37 500	8
110	121	3 200—31 500	5 000—37 500	10,5
220	242	15 000—31 500	10 500—37 500	13

Примечание: См. также в конце книги „Извлечения из ОСТ 4815".

§ 79. Вопросы для самопроверки.

1. Каковы условия параллельного включения однофазных трансформаторов?
2. Как соединяются между собою концы обмоток параллельно включенных однофазных трансформаторов?
3. Каковы условия параллельного включения трехфазных трансформаторов?
4. Можно ли соединить параллельно трансформаторы с обмотками: звезда — звезда и звезда — треугольник?
5. Каким условиям должны удовлетворять параллельно соединяемые трансформаторы для того, чтобы они нагружались пропорционально их номинальным мощностям?
6. Как изобразится диаграмма параллельно работающих трансформаторов?
7. Для двух однофазных трансформаторов мощностью 100 kVA с напряжениями $V_1 : V_2 = 11\,000 : 460$ V имеются следующие данные опыта короткого замыкания:

	I_{1k}	V_{1k}	P_{1k}
а) стержневой трансформатор	9,1	265	1004
в) броневой "	9,1	310	1000

Оба трансформатора соединены параллельно со стороны высшего и низшего напряжения, причем доставляют сети мощность 186 kW при коэфициенте мощности $\cos\varphi = 0{,}9$. Какой ток, в процентах от номинального, дает каждый из трансформаторов?

ГЛАВА ДЕВЯТНАДЦАТАЯ.

АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ И РЕГУЛИРОВОЧНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ.

§ 80. Автотрансформаторы.

Автотрансформатор по своему устройству отличается от обычного трансформатора тем, что первичные и вторичные обмотки его не разобщены друг от друга, а, наоборот, соединены между собою электрически так, как будто вторичная обмотка составляет часть

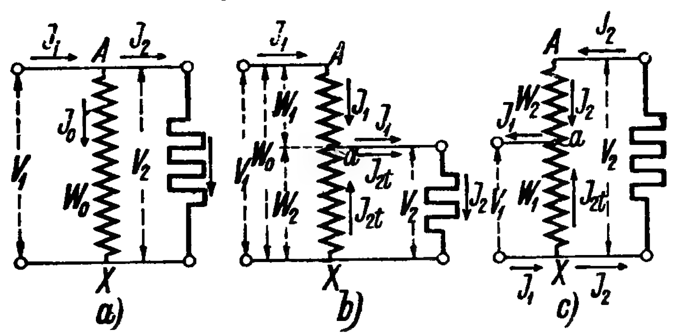


Рис. 160.

первичной (рис. 160b). Для того чтобы уяснить работу автотрансформатора, предположим, что мы имеем трансформатор с одною лишь первичною обмоткою, содержащею w_0 витков (рис. 160a). Если к зажимам AX обмотки присоединить цепь с приемниками, то от источника тока пойдет ток I_1, который будет равен намагничивающему току I_0 и току приемников I_2. Пренебрегая намагничивающим током, мы можем сказать, что ток приемников равен току источника тока. Мощность приемников в этом случае непосредственно получается от источника тока.

Предположим теперь, что цепь приемников соединена с частью обмотки aX, содержащей w_2 витков (рис. 160b). В таком случае первичный ток I_1, направляясь в приемники, пройдет по другой части обмотки Aa, содержащей $w_1 = w_0 - w_2$ витков, где w_0 — число витков всей обмотки AX. Этот ток нарушит магнитное состояние трансформатора, которое ранее соответствовало намагничивающим амперниткам $I_0 w_0$.

Следствием этого в части обмотки aX индуктируется ток I_{2t} такой

силы и такого направления, что его ампервитки почти равны ампервиткам первичного тока, т. е.

$$I_{2t}w_2 = I_1 w_1.$$

Как и в обычных трансформаторах, индуктируемый ток I_{2t} является вторичным током; он прямо противоположен первичному току (рис. 160b). Так как токи I_1 и I_{2t} в точке a обмотки сходятся, то в цепи приемников или во вторичной цепи пойдет ток I_2, равный сумме их, т. е.

$$I_2 = I_1 + I_{2t}.$$

Из равенства ампервитков, т. е. из равенства $I_1 w_1 = I_{2t} w_2$, мы можем определить силу тока I_{2t}:

$$I_{2t} = I_1 \frac{w_1}{w_2}.$$

Таким образом ток вторичной цепи будет равен

$$I_2 = I_1 + I_1 \frac{w_1}{w_2} = I_1 \left(\frac{w_1 + w_2}{w_2}\right) = I_1 \frac{w_0}{w_2}.$$

Последнее равенство показывает, что соотношение между токами первичной и вторичной цепей такое же, как и у двухобмоточного трансформатора с коэфициентом трансформации $u = \frac{w_0}{w_1}$. Сравнивая, однако, автотрансформатор с обычным трансформатором, мы найдем в их работе принципиальную разницу. В самом деле, у обычного трансформатора вторичная мощность, равная $V_2 I_2$, полностью получается трансформацией, т. е. перебрасывается с первичной обмотки на вторичную магнитным потоком. У автотрансформатора вторичная мощность равна

$$V_2 I_2 = V_2 I_1 + V_2 I_{2t}.$$

Как видно из последнего равенства

вторичная мощность автотрансформатора составляется из двух частей: мощности $V_2 I_1$, которая переносится первичным током I_1 непосредственно во вторичную цепь, ибо обе цепи соединены электрически, и мощности $V_2 I_{2t}$, которая получается трансформацией при участии магнитного потока.

Объем и вес автотрансформатора определяется главным образом трансформируемой мощностью. Имея в виду, что трансформируемый ток

$$I_{2t} = I_2 - I_1$$

и

$$I_1 = I_2 \frac{w_2}{w_0} = \frac{I_2}{u},$$

где $u = \frac{w_0}{w_2}$ — коэфициент трансформации, имеем

$$I_{2t} = I_2 - \frac{I_2}{u} = I_2 \left(\frac{u-1}{u}\right).$$

Следовательно трансформируемая мощность

$$V_2 I_{2t} = V_2 I_2 \left(\frac{u-1}{u}\right) = P_2 \left(\frac{u-1}{u}\right) = P_2 \left(1 - \frac{1}{u}\right).$$

Из полученного выражения следует, что трансформируемая мощность составляет только $\left(1 - \frac{1}{u}\right)$ часть вторичной (или первичной) мощности P_2. Следовательно автотрансформатору нужно дать размеры как обычному трансформатору, имеющему мощность $P_2 \left(1 - \frac{1}{u}\right)$. Чем ближе отношение $\frac{1}{u}$ к единице, т. е. чем ближе u к единице, тем легче и дешевле автотрансформатор сравнительно с трансформатором. Например, при $u=2$ трансформируемая мощность автотрансформатора

$$V_2 I_{2t} = P_2 \left(1 - \frac{1}{2}\right) = \frac{1}{2} P_2,$$

т. е. автотрансформатор может быть рассчитан на мощность, вдвое меньшую сравнительно с обычным трансформатором. Наоборот, если обычный трансформатор с коэфициентом трансформации $u = 2$ превратить в автотрансформатор с тем же коэфициентом трансформации, то последний может дать вдвое большую мощность; при $u = 1{,}2$ он может дать в шесть раз большую мощность; при $u = 1$ автотрансформатор превращается в дроссельную катушку (см. рис. 160a).

Итак,

автотрансформаторы целесообразно применять при невысоких коэфициентах трансформации. В цепях высокого напряжения разница в напряжениях первичной и вторичной сторон допускается обычно не более, чем в 25%.

Автотрансформатор может быть не только понизительным, но и повысительным. На рис. 160c изображена схема повысительного автотрансформатора с указанием токов в частях его обмотки. В части Aa проходит ток вторичной цепи I_2. Ампервитки части обмотки Aa, равные $I_2 w_2$, уравновешиваются ампервитками части обмотки aX, равными $I_{2t} w_1$. Это равновесие будет при условии, что ток I_{2t} прямо противоположен по направлению току I_2. Имея это в виду, мы получаем для узла X равенство

$$I_{2t} = I_1 - I_2$$

или
$$I_2 = I_1 - I_{2t}.$$

Если напряжение части обмотки Aa обозначить через ΔV, то
$$V_2 = V_1 + \Delta V.$$

Вторичная же мощность будет
$$I_2 V_2 = I_1 V_2 + I_2 \Delta V.$$

Часть этой мощности $I_2 \Delta V$ является трансформаторной; на эту мощность и рассчитывается автотрансформатор как трансформатор.

Коэфициент полезного действия автотрансформатора выше коэфициента полезного действия соответствующего ему по мощности двухобмоточного трансформатора, так как потери в меди у первого меньше, чем у второго. Коэфициент полезного действия для двухобмоточного трансформатора и для автотрансформатора (понизительного, рис. 160b) можно написать в следующем виде:

$$\eta_t = \frac{V_2 I_2 \cos\varphi_2}{V_2 I_2 \cos\varphi_2 + I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + P_ж},$$

и

$$\eta_{at} = \frac{V_2 I_2 \cos\varphi_2}{V_2 I_2 \cos\varphi_2 + I_1^2 (R_1 - R_2) + (I_2 - I_1)^2 R_2 + P_ж}.$$

В этих выражениях I_1 и I_2 — токи первичной и вторичной цепей, R_1 и R_2 — сопротивления первичной и вторичной обмоток двухобмоточного трансформатора, $R_1 - R_2$ — сопротивление обмотки автотрансформатора с током I_1, R_2 — сопротивление обмотки автотрансформатора с трансформаторным током $I_{2t} = I_2 - I_1$, $P_ж$ — потери в железе.

Из последнего выражения следует, что коэфициент полезного действия автотрансформатора больше, чем трансформатора, так как потери в меди в нем меньше. Далее следует, что коэфициент полезного действия тем больше, чем ближе коэфициент трансформации к единице, т. е. чем меньше разности $R_1 - R_2$ и $I_2 - I_1$.

Экономические выгоды автотрансформатора в значительной мере ослабляются недостатками его в отношении эксплоатационном. Электрическая связь цепи низкого напряжения с цепью высшего напряжения создает опасность для обслуживающих цепь низшего напряжения и требует более высокой степени изоляции приборов в этой последней цепи. Всякого рода перенапряжения в линии высокого напряжения могут проникнуть в цепь низкого напряжения и разрушительно воздействовать на аппаратуру низкого напряжения.

Помимо этого токи короткого замыкания у автотрансформаторов могут иметь более тяжелые последствия, чем у двухобмоточных трансформаторов. В самом деле, если при коэфициенте трансформации $u = 2$, мощность автотрансформатора равна 100 kVA, то размеры его будут соответствовать размерам двухобмоточного трансформатора мощностью 50 kVA. Поэтому ток короткого замыкания автотрансформатора, соответствующий мощности 100 kVA (а не мощности 50 kVA) может иметь более тяжелые последствия, чем у двухобмоточного трансформатора мощностью 100 kVA.

§ 81. Диаграмма электродвижущих сил и токов автотрансформатора.

Диаграмму электродвижущих сил автотрансформатора можно построить, имея в виду, что его можно рассматривать как обычный трансформатор, у которого первичная обмотка имеет w_1 витков (на рис. 160b часть Aa), а вторичная обмотка имеет w_2 витков (на рис. 160b часть aX). Первичный ток у этого трансформатора I_1, а вторичный ток $I_{2t} = I_1 \frac{w_1}{w_2}$ и коэфициент трансформации $u' = \frac{w_1}{w_2}$.

На рис. 161 изображена диаграмма автотрансформатора для случая индуктивной нагрузки, когда вторичный ток смещен по фазе относительно вторичного напряжения на угол φ_2. На этой диаграмме Oc — вектор электродвижущей силы E_2, индуктируемой во вторичной обмотке aX (рис. 160b); cf — вектор падения напряжения в реактивном сопротивлении этой обмотки, т. е. $I_{2t} x_2$; fp — вектор падения напряжения в реактивном сопротивлении внешней цепи $I_2 X$; gf — вектор падения напряжения в активном сопротивлении обмотки aX, равный $I_{2t} R_2$; Og — вектор вторичного напряжения V_2; Ot — вектор вторичного тока I'_{2t}, приведенного к первичной обмотке, т. е. тока $I'_{2t} = I_{2t} \frac{w_2}{w_1}$; Oa — вектор намагничивающего тока; Ob — вектор первичного тока I_1; Od — вектор первичной электродвижущей силы E_1, индуктируемой в первичной обмотке Aa и равной $E_2 \frac{w_1}{w_2}$; de и ek — векторы падений напряжения в активном и реактивном сопротивлениях обмотки Aa; Ok — вектор первичного напряжения V_1', приложенного к обмотке Aa.

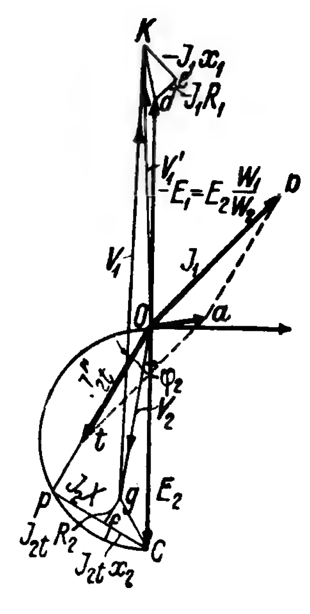


Рис. 161.

Полное первичное напряжение V_1, т. е. напряжение у зажимов AX (рис. 160b), изображается вектором gk.

На рис. 162a приведена схема включения трехфазного автотрансформатора с обмотками, соединенными звездой, причем для защиты вторичной сети от перенапряжения, могущего появиться в первичной цепи, нейтраль соединена с землею через роговой разрядник. Такая же защита вторичной цепи необходима и при однофазном автотрансформаторе: через роговой разрядник с землею соединяется линия, являющаяся общей для обеих цепей.

На рис. 162b приведена схема включения трехфазного автотрансформатора с обмотками, соединенными треугольником, на рис. 162c приведена схема трехфазного автотрансформатора со смешанным соединением обмоток.

§ 82. Трансформаторы с переменным коэфициентом трансформации.

При установке трансформаторов в разных пунктах первичной сети может случиться, что напряжение этих пунктов неодинаково и не соответствует тому первичному напряжению, при котором вторичное напряжение было бы нормальным. Например, если первичное напряжение несколько ниже нормального первичного напряжения, то при неизменном коэфициенте трансформации трансформатора вторичное напряжение будет также ниже нормального. Для того чтобы получить во вторичной цепи напряжение, возможно близкое к нормальному, сетевые трансформаторы выполняются с обмотками, имеющими не одно, а несколько ответвлений, отходящих от разных точек обмотки. Беря то или иное ответвление, т. е. включая в цепь то или иное число витков обмотки, можно изменить коэфициент трансформации трансформатора и получить надлежащее вторичное напряжение.

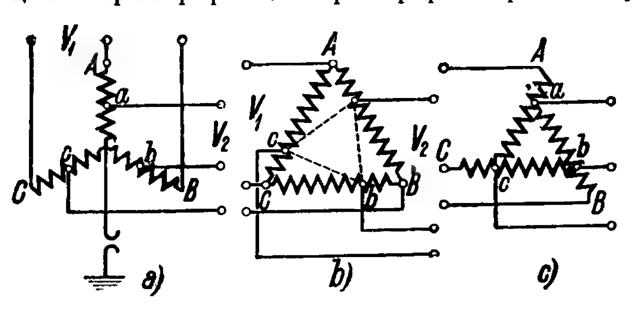


Рис. 162.

Так как в рассматриваемом случае речь идет не о регулировании вторичного напряжения, а только о подборе надлежащей величины его, то число ответвлений у обмотки может быть невелико—одно-два. Добавочные ответвления может иметь или первичная, или вторичная обмотка. Предположим, например, что имеется трансформатор с напряжением 3000/220 V, который устанавливается в пункте первичной сети с напряжением 2850 V, т. е. на 5% меньшим нормального. Чтобы получить вторичное напряжение 220 V, можно иметь на вторичной обмотке добавочное ответвление, включающее 5% лишних витков вторичной обмотки. Но можно иметь на первичной обмотке добавочное ответвление, выключающее 5% первичной обмотки, т. е. вводящее в цепь 95% первичных витков. Для того чтобы сечение отводящих ток проводников было невелико и выводы получались небольшими, добавочные ответвления устраиваются обычно у обмоток высшего напряжения. У трансформаторов небольшой мощности добавочные ответвления устраиваются иногда и у обмоток низшего напряжения.

Согласно общесоюзному стандарту ОСТ 4815 на обмотке высшего напряжения понижающих трансформаторов мощностью до 5600 kVA на напряжение до 35 kV устраиваются два дополнительных ответвления на $\pm 5\%$.

На обмотке высшего напряжения остальных трансформаторов как понижающих, так и повышающих устраиваются четыре дополнительных ответвления на $\pm 2 - 2{,}5\%$.

На рис. 163a приведены схемы однофазной обмотки, снабженной

ответвлениями. У первой обмотки ответвления взяты у концов катушек, у второй обмотки — у средин катушек двух стержней. Второй способ выполнения ответвлений более рационален, так как дает меньшее нарушение симметрии обмоток, что вызывает добавочные механические усилия раза в 3—4 меньшие сравнительно с первым способом (см. далее о механических усилиях, действующих на обмотки).

На рис. 163b приведена схема трехфазной обмотки, снабженной добавочными выводами посредине катушек.

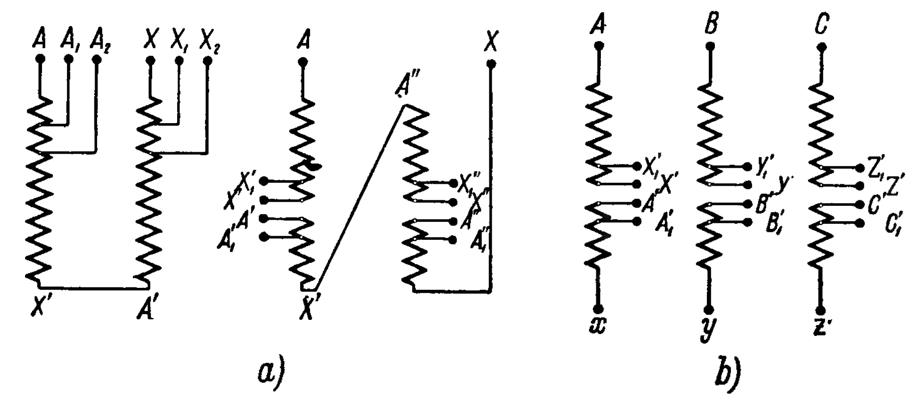


Рис. 163.

Предположим, что имеется повысительный трансформатор и требуется получить со стороны вторичной обмотки напряжение 3150 V. В таком случае мы должны соединить концы A' с X', B' с Y' и C' с Z'. Если требуется получить напряжение 3000 V, то необходимо соединить концы A'_1 с X', B'_1 с Y' и C'_1 с Z'; если, наконец, требуется получить напряжение 2850 V, то необходимо соединить концы A'_1 с X'_1, B'_1 с Y'_1 и C'_1 с Z'_1.

§ 83. Регулировочные трансформаторы.

Под регулировочными трансформаторами подразумеваются такие трансформаторы, у которых вторичное напряжение можно менять в широких пределах при постоянном первичном напряжении. Простейшими из них являются так называемые секционированные трансформаторы, т. е. такие, у которых вторичная обмотка снабжена несколькими выводами, кончающимися контактами, по которым скользит лапка ползунка, соединенного со вторичною цепью. На рис. 164a схематически изображен однофазный секционированный трансформатор с семью ступенями регулирования, причем приспособления для предотвращения разрыва цепи при переходе лапки с одного контакта на другой пока не дано (о них будет сказано дальше). Вторичная цепь начинается у зажимов a и x; лапка M одним концом располагается на контактах выводов, а другим — на металлической пластине $Л$. Напряжение регулируется включением или выключением секционированной части вторичной обмотки.

Для того чтобы уменьшить число выводов, секционированную часть обмотки можно выполнить переключаемой таким образом, чтобы ее напряжение или складывалось с напряжением несекционированной части обмотки, или вычиталось из него. На рис. 164b переключение секционированной части обмотки производится переключателем S. Если переключатель S поставить на верхний контакт, то напряжение секционированной части будет вычитаться из напря-

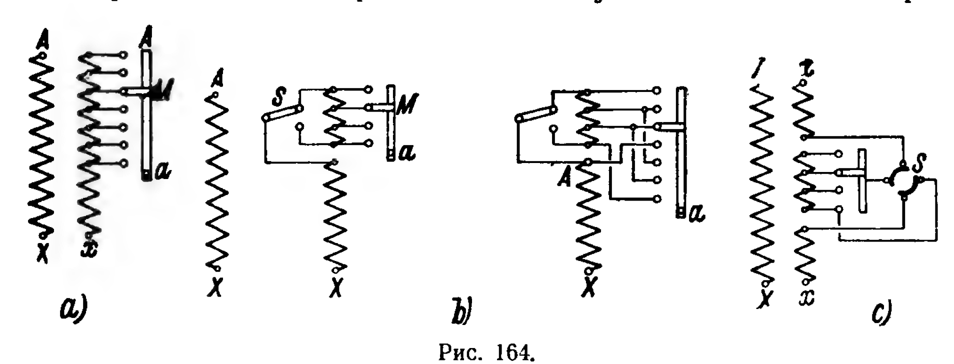


Рис. 164.

жения несекционированной части обмотки; при положении переключателя на нижнем контакте напряжение секционированной части будет складываться с напряжением несекционированной части обмотки. Перемещением лапки M в обоих случаях можно менять вычитаемое или добавляемое напряжение.

На рис. 164с секционированная часть помещена в середине обмотки. Такое устройство делается у трехфазных трансформаторов

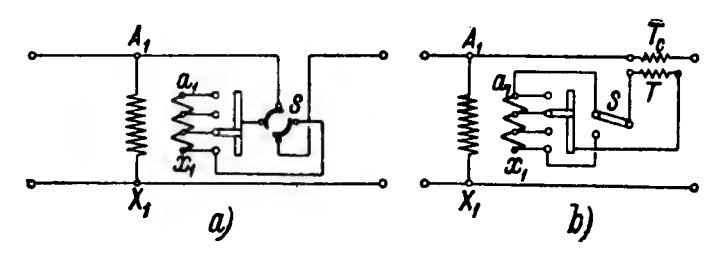


Рис. 165.

с вторичными обмотками, соединенными треугольником. Переключатель S выполняется в этом случае двухполюсным.

У трансформаторов большой мощности вторичное напряжение часто регулируется особыми секционированными, так называемыми вольтодобавочными трансформаторами (или бустерами), включаемыми в цепь главного трансформатора. На рис. 165 приведены две схемы включения секционированного вольтодобавочного трансформатора. В первой схеме вторичная обмотка вольтодобавочного трансформатора включена непосредственно в линию главного трансформатора, а первичная обмотка включена параллельно с линией. Во второй схеме вторичная обмотка вольтодобавочного трансформатора

включена в линию через сериес-трансформатор T_c. Переключателями S в обоих случаях можно напряжение вольтодобавочного трансформатора прибавлять или вычитать из напряжения главного трансформатора (не изображенного на рис. 165).

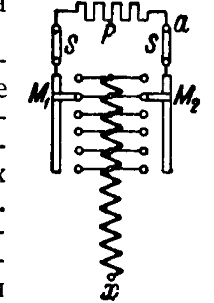


Рис. 166.

Для того чтобы при переходе лапки M с одного контакта на другой не прерывался ток и не было полного короткого замыкания секции, находящейся между соседними контактами, применяют особые дополнительные устройства. Одно из таких устройств схематически изображено на рис. 166. Секционированная часть вторичной обмотки снабжена двумя рядами контактов, по которым могут перемещаться две лапки M_1 и M_2, соприкасающиеся одновременно и с своими ползунками. Ползунки через выключатели $S-S$ соединяются с сопротивлением R. При переходе с одной ступени регулирования на другую левый выключатель S, размыкается и переставляется левая лапка M_1, после чего выключатель S снова замыкается. Затем правый выключатель размыкается, и переставляется правая лапка M_2 на следующий контакт. В момент перехода с контакта на контакт ток в линии идет через сопротивление R. В рабочем положении обе лапки M_1 и M_2 касаются контактов одного и того же вывода.

Рис. 167.

Второе устройство изображено на рис. 167. Вместо омического сопротивления включена реактивная катушка D, причем вторичная цепь начинается от середины катушки. Лапки M_1 и M_2 нормально расположены на контактах, примыкающих к началу и концу одной секции. Таким образом реактивная катушка является делителем напряжения одной секции.

При переходе на новую ступень регулирования левый выключатель S размыкается, левая лапка M_1 (без тока) перемещается на соседний контакт, и выключатель S снова замыкается. То же проделывается и с правым выключателем S и правою лапкою M_2. В период перемещения лапки с контакта на контакт вторичный ток проходит только через половину реактивной катушки. Так как железо катушки сильно насыщается, то большого падения напряжения при этом не получается.

На рис. 168 схематически изображено весьма распространенное устройство для переключения секций регулировочного трансформатора, предложенное Янсеном. При нормальной работе переключатель S располагается на двух левых контактах, шунтируя сопротивление R_1. При перехо-

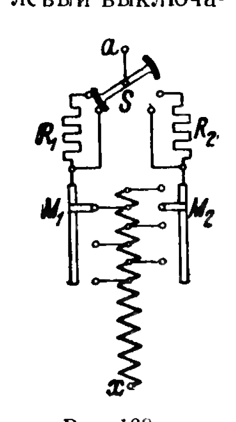


Рис. 168.

де на следующую ступень регулирования правая лапка M_2, которая до этого не лежала на контакте, переводится на контакт, а затем переключатель S перебрасывается в правое положение. При своем повороте переключатель S на короткий промежуток времени соединяет последовательно сопротивления R_1 и R_2; на эти сопротивления и будет замкнута переключаемая секция обмотки. В следующий момент цепь с сопротивлениями разомкнется, но последовательно со вторичною цепью включится сопротивление R_2, которое затем переключателем S закорачивается.

Перемещение лапок и поворот переключателя согласуются с механической передачей, приводимой в действие или от руки, или небольшим электродвигателем.

Так как секционные переключатели M_1 и M_2 переключаются без тока, то они часто помещаются в баке с маслом трансформатора. Переключатель же S, который разрывает цепь с током, помещается вне бака, так как получающаяся при разрыве цепи вольтова дуга загрязняла бы масло.



Рис. 169.

В виду того, что выключение части обмотки всегда сопровождается нарушением симметрии, которая вызывает добавочное магнитное рассеяние, добавочные механические усилия (см. далее), рекомендуется выключаемые секции брать не в одном месте вторичной обмотки, а по возможности равномерно в разных местах по длине сердечника. Выполнение такого трансформатора, однако, в значительной степени увеличивает его стоимость.

На рис. 169 изображен трехфазный регулировочный трансформатор с встроенными секционными переключателями.

§ 84. Регулировочный трансформатор с выдвижным сердечником завода Кох-Штерцеля.

Регулировочный трансформатор завода Кох-Штерцеля схематически изображен на рис. 170. Он состоит из полого железного якоря $I—I$, внутри которого может перемещаться железный сердечник K. В кольцевых выемках якоря заложены первичные обмотки A и B, включаемые к первичной сети так, чтобы магнитные потоки, создаваемые ими, были направлены навстречу друг другу. На сердечник K наложена вторичная обмотка C. В среднем положении сердечника K, как это представлено на рис. 170b, во вторичной обмотке C никакой электродвижущей силы не индуктируется. При перемещении сердечника вверх (рис. 170a) во вторичной

обмотке индуктируется электродвижущая сила одного направления, постепенно возрастающая по величине. При перемещении сердечника вниз (рис. 170c) в той же обмотке индуктируется также постепенно возрастающая по величине электродвижущая сила, но другого направления, так как эта обмотка пронизывается магнитным потоком, противоположно направленным по отношению к потоку первого случая.

Рис. 170.

Включая вторичную обмотку в линию по схеме рис. 171 и перемещая сердечник вверх и вниз, можно регулировать плавно вторичное напряжение в пределах $V_2 = V_1 + \Delta V$ и $V_2 = V_1 - \Delta V$, где V_1 и V_2 — первичное и вторичное напряжения и ΔV — наибольшее напряжение, индуктируемое во вторичной обмотке при совмещении обмотки C с обмоткой A или B.

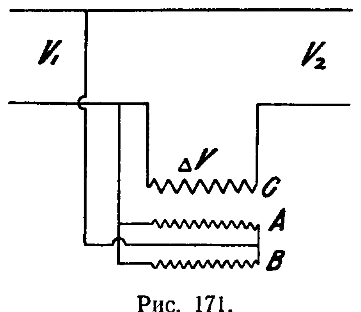


Рис. 171.

Лучшее использование прибора получится при включении вторичной обмотки так, как она включается в автотрансформаторах, причем если требуется регулировать напряжение от нуля до нормального значения, то вторичную обмотку можно рассчитывать на напряжение, вдвое меньшее нормального, но на ток, равный нормальному. Схема включения для этого случая изображена на рис. 172: средние точки первичных обмоток A и B соединяются между собою и с одним концом вторичной обмотки C, другой конец которой соединяется с линией. Если напряжение первичной цепи 100 V, а вторичная обмотка рассчитана на 50 V, и кроме того конец вторичной обмотки соединен со средними точками первичных обмоток (делящими напряжение 100 V пополам), то в нижнем положении вторичной катушки регулируемое напряжение будет $50 - 50 = 0$ V; в среднем положении вторичной катушки регулируемое напряжение будет $50 - 0 = 50$ V, а в верхнем положении вторичной обмотки то же напряжение будет $50 + 50 = 100$ V. Мощность автотрансформатора должна быть равна $50 \cdot I$, где I — нормальный ток.

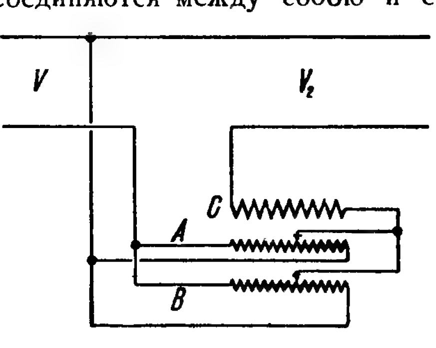


Рис. 172.

На рис. 173 изображена схема регулировочного трансформатора

для трехфазного тока. Первичные обмотки трех однофазных трансформаторов соединены звездою; одни концы вторичных обмоток соединены с концами первичных обмоток, к которым подводится напряжение; другие же концы тех же вторичных обмоток подведены к сети, в которой регулируется напряжение.

Так как трансформатор Кох-Штерцеля применяется обычно в качестве вольтдобавочного трансформатора (см. схемы рис. 172—173), то вторичная обмотка его находится под током во всех положениях выдвижного сердечника. Вследствие этого вторичная обмотка создает вокруг себя поле рассеяния, особенно сильное в среднем положении сердечника (рис. 170b). Для того чтобы ослабить это поле рассеяния, на неподвижном якоре $I - I$ накладываются, кроме первичных обмоток A и B, еще дополнительные (на рис. 170 не показанные) обмотки, замкнутые накоротко. Токи, индуктируемые в этих обмотках, создают поле, направленное против поля рассеяния вторичной обмотки.

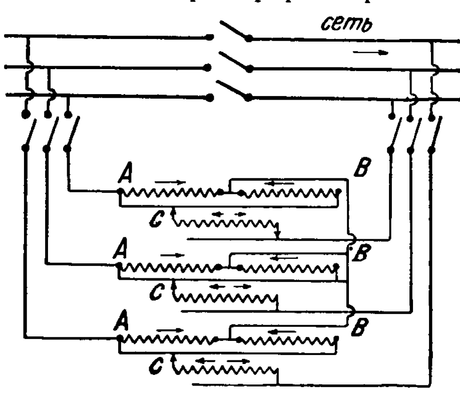
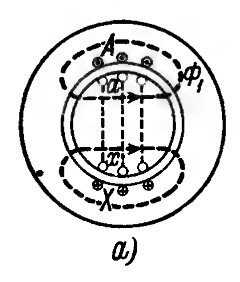
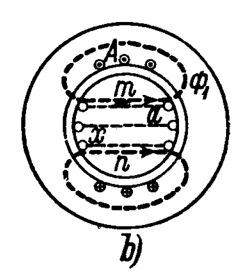


Рис. 173.

§ 85. Однофазный потенциальный регулятор.

Взаимное изменение первичной и вторичной обмоток трансформатора можно получить, используя не только прямолинейное движение, как это имеется в только что описанном устройстве, но и круговое. Такое движение имеет место в так называемых потенциальных регуляторах однофазного и трехфазного тока.





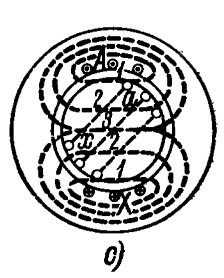


Рис. 174.

Потенциальный регулятор однофазного тока по принципу действия представляет собою трансформатор, первичная и вторичная обмотки которого могут принимать разные взаимные положения. По своей конструкции потенциальный регулятор подобен асинхронному двигателю однофазного тока. Точно так же, как и последний, он состоит из неподвижного железного кольца — статора, на котором помещена одна из индуктирующих обмоток (первичная или вторичная, смотря по включению) $A - X$ и из железного кольца — ротора — с другою индуктирующей обмоткой $a - x$ (рис. 174a). Ротор расположен внутри статора и имеет возможность поворачиваться вокруг своей оси.

Если ротор повернуть так, чтобы ось его обмотки совметилась с осью обмотки статора (рис. 174a), то магнитный поток статора полностью пронижет вторичную обмотку ax. Если ротор повернуть так, чтобы ось его обмотки была перпендикулярна к оси обмотки статора (рис. 174b), то поток статора совершенно не пронижет вторичной обмотки. В первом случае во вторичной обмотке будет индуктироваться наибольшая электродвижущая сила; во втором случае никакой электродвижущей силы индуктироваться не будет.

В промежуточном положении обмотки ротора только часть силовых линий поля статора сцепляется со всеми витками обмотки ротора — на рис. 17c силовые линии 3 — 3; другая часть пройдет мимо обмотки или сцепится с некоторыми витками ее — на рис. 173c силовые линии 1 — 1 и 2 — 2. Вследствие этого электродвижущая сила в обмотке будет больше нуля, но меньше наибольшей. Таким образом, меняя положение вторичной обмотки ротора относительно первичной обмотки статора, можно получить вторичную электродвижущую силу в пределах от нуля до наибольшей.

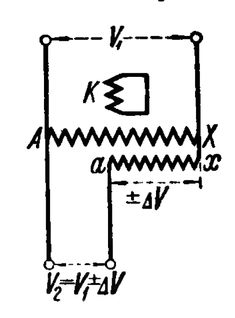


Рис. 175.

Вторичная обмотка ротора может работать совершенно самостоятельно, не имея электрического соединения с первичной обмоткой статора, как это имеет место у трансформатора. Обычно же обмотки статора и ротора соединяются между собою так, как у автотрансформатора (рис. 175). Так как по отношению ко вторичной цепи обмотки статора и ротора соединены последовательно, то напряжение на зажимах вторичной цепи будет равно сумме или разности напряжений обеих обмоток в зависимости от того, в какую сторону повернута обмотка ротора от положения ее, при котором она не пронизывается потоком статора, т. е. от положения, изображенного на рис. 174b. В самом деле, если при повороте ротора относительно его положения, изображенного на рис. 174b, влево магнитный поток статора пронизывает обмотку ротора от витка m к витку n, то при повороте ротора вправо тот же поток в тот же момент времени будет пронизывать обмотку ротора от витка n к витку m. Это значит, что если в первом случае электродвижущая сила в обмотке ротора была направлена от начала a к концу x, то во втором случае она будет направлена от конца x к началу a. Таким образом в одном положении ротора напряжение обмотки ротора будет складываться с напряжением статора, а в другом положении оно будет вычитаться из напряжения статора.

Потенциальный регулятор однофазного тока с одною обмоткою AX далеко несовершенен, так как обладает большим индуктивным сопротивлением при всех положениях ротора, кроме тех, когда оси обмоток совпадают. В самом деле, если ось обмотки ротора составляет с осью обмотки статора некоторый угол α, то только

часть потока ротора $\Phi_{21} = \Phi_2 \cos\alpha$, замыкающаяся по линиям $1 - 1$ рис. 176, прямо противоположна потоку статора и им компенсируется. Другая часть потока ротора $\Phi_{22} = \Phi_2 \sin\alpha$, замыкающаяся по линиям $2 - 2$, свободно пронизывает обмотку ротора и индуктирует в ней электродвижущую силу самоиндукции, т. е. повышает ее индуктивное сопротивление (от поля рассеяния). Составляющая поля ротора, направленная перпендикулярно к оси поля статора, называется часто поперечным полем. Чтобы ослабить поперечное поле ротора, на статоре располагается вторая, короткозамкнутая, так называемая компенсационная обмотка $K - K$, ось которой перпендикулярна к оси первой обмотки. Поперечный поток ротора Φ_{22}, пронизывая короткозамкнутую обмотку $K - K$, индуктирует в ней ток такого направления, что создаваемый им поток почти целиком (до поля рассеяния) уничтожает поперечный поток. Таким образом реактивная составляющая напряжения сводится к электродвижущим силам от полей рассеяния во всех трех обмотках. Так как эти поля, вообще говоря, невелики, то коэфициент мощности подобного потенциального регулятора может быть довольно высоким (до 90%)

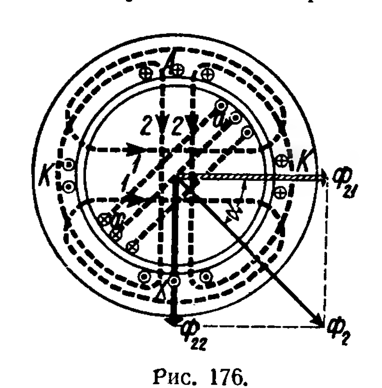


Рис. 176.

§ 86. Трехфазный потенциальный регулятор.

Если однофазный потенциальный регулятор по своей конструкции отличается от асинхронного двигателя однофазного тока только компенсационною обмоткою на статоре, то конструкция трехфазного потенциального регулятора ничем не отличается от конструкции асинхронного двигателя, имеющего ротор с фазною обмоткою. Отсутствуют только кольца, так как обмотка ротора соединяется с обмоткою статора гибким кабелем, допускающим поворот ротора на относительно большой угол. В противоположность однофазному потенциальному регулятору, у трехфазного потенциального регулятора первичное напряжение подводится к обмотке ротора (рис. 177). Делается это с тою целью, чтобы не удваивать числа гибких кабелей.

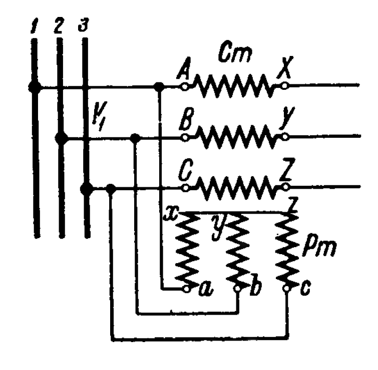


Рис. 177.

Явления в трехфазном потенциальном регуляторе несколько отличаются от явлений в однофазном потенциальном регуляторе, так как в рассматриваемом случае первичные обмотки, т. е. обмотки ротора, создают вращающееся магнитное поле. Это поле постоянно по величине, ибо соответствует постоянному первичному напряжению, а потому и индуктируемые им электродвижущие силы в обмотках статора и ротора также постоянны по величине и не зависят от положения ротора. От положения ротора зависит только взаимный сдвиг их по фазе. В самом деле, пусть ротор находится в таком положении, что в некоторый момент времени ось вращающегося поля OP совпадет с осью фазы статора $A - X$ и с осью фазы ротора $a - x$ (рис. 178a). В этот момент, как известно из теории вращающегося поля, ток в фазе ротора $a - x$ имеет наибольшее значение. Через промежутки времени, равные одному периоду, ось вращающегося поля будет неизменно совпадать с осью фазы $a - x$ ротора. Если бы ротор был повернут относительно вертикальной линии на некоторый угол, например на угол, равный 30° (рис. 178b), то в рассматриваемые нами моменты времени ось вращающегося поля окажется повернутой относительно оси фазы $A - X$ на тот же угол. Это следует из того, что, как бы мы ни перемещали ротор, ток в фазе его $a - x$ будет иметь наибольшие значения через те же промежутки времени, что и раньше а потому ось вращающегося поля будет совпадать с осью обмотки $a - x$ через те же промежутки времени, что и раньше.

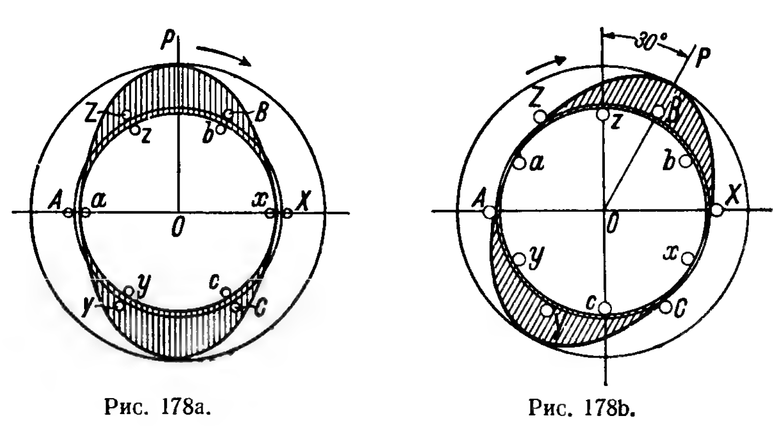


Рис. 178a. Рис. 178b.

Сравнивая относительное положение вращающегося поля и обмоток статора и ротора (рис. 178a и 178b), нетрудно видеть, что при первом положении ротора электродвижущие силы статора E_c и ротора E_p или совпадают по фазе, или же отличаются на 180°. При втором же положении ротора эти электродвижущие силы отличаются по фазе или на 30°, или же на 30 — 180°, ибо вращающееся поле пронизывает обмотку статора $A - X$ раньше, нежели обмотку ротора $a - x$. Так как обмотки статора и ротора соединены электрически по схеме рис. 177, то на зажимах вторичной цепи напряжение будет равно геометрической сумме электродвижущей силы обмотки статора и напряжения на зажимах ротора (если пренебречь падениями напряжения).

На рис. 179 представлено геометрическое сложение электродвижущих сил для четырех положений ротора. Первое положение: оси соответственных фаз статора и ротора совпадают, причем направление намотки витков их одинаково; второе положение: ротор

повернут в направлении вращения поля на 90° (электрических); третье положение: ротор повернут на 180° (электрических или $\frac{180}{p}$ геометрических, где p — число пар полюсов); четвертое положение: ротор повернут на 180 — 90° по направлению вращения поля или на 90° в обратном направлении. Изображенные на рис. 179 диаграммы показывают, что в зависимости от положения ротора напряжение у первичной цепи сдвигается по фазе относительно напряжения вторичной цепи на тот или иной угол. Перемещение ротора производится при помощи червячной передачи, которая должна быть рассчитана на преодоление момента вращения ротора.

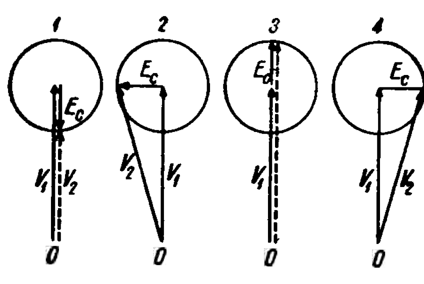


Рис. 179.

Мощность потенциального регулятора определяется так же, как мощность автотрансформатора, т. е. эта мощность составляет

$$P_{n\cdot p} = P_2 \left(1 - \frac{V_1}{V_2}\right),$$

где P_2 — мощность вторичной цепи, а V_1 и V_2 — напряжения первичной и вторичной цепей.

Из рис. 179 видно, что регулируемое вторичное напряжение V_2 меняет свою фазу при разных положениях ротора. Это обстоятельство не может быть терпимо в тех случаях, когда потенциальный регулятор работает параллельно с каким-либо другим потенциальным регулятором или с трансформатором. Чтобы избежать смещения фазы вторичного напряжения, применяют или два отдельных потенциальных регулятора, или же один сдвоенный потенциальный регулятор, у которого роторы насажены на общий вал. Схема включения двух регуляторов указана на рис. 180а. Обмотки роторов соединены с первичною сетью таким образом, что магнитные поля, ими создаваемые, вращаются в разные стороны. В таком случае поворот роторов в одну сторону и на один и тот же угол имеет следствием поворота векторов электродвижущих сил в статорах в разные стороны относительно вектора электродвижущей силы ротора. Диаграмма сложения напряжений показана на рис. 180b. Из этой диаграммы видно, что равнодействующее напряжение V_2 сохраняет свою фазу.

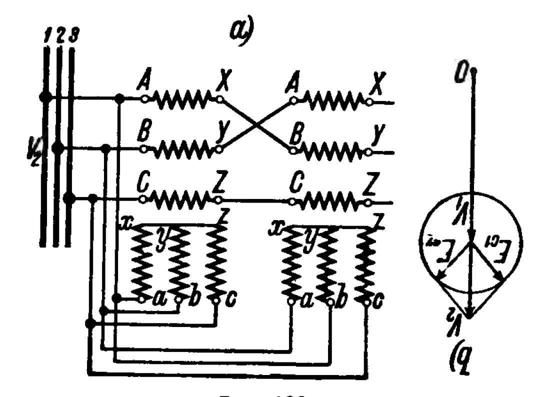


Рис. 180.

§ 87. Вопросы для самопроверки.

1. В чем заключается принципиальное отличие автотрансформатора от двухобмоточного трансформатора?
2. Как изображается диаграмма автотрансформатора?
3. Для какой цели обмотки трансформатора снабжаются добавочными выводами?
4. Что подразумевается под трансформатором с переменным коэфициентом трансформации?
5. Каковы схемы регулировочных трансформаторов?
6. Каково устройство и каково действие однофазного потенциального регулятора?
7. Для какой цели применяется у однофазного потенциального регулятора компенсационная обмотка?
8. Каково устройство и каково действие трехфазного потенциального регулятора?

ГЛАВА ДВАДЦАТАЯ.

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ.

§ 88. Сериес-трансформаторы.

Под сериес-трансформаторами подразумеваются такие трансформаторы, у которых первичная обмотка включается последовательно с питающим приемник первичным током, а вторичная включается на нагрузку (рис. 181). Легко видеть, что при разомкнутой вторичной цепи первичная цепь сериес-трансформатора превращается в реактивную катушку, так как весь проходящий через нее первичный ток является в этом случае намагничивающим током. Когда же вторичная цепь будет замкнута на какое-либо сопротивление, ток вторичной обмотки окажет размагничивающее действие на сердечник трансформатора, другими словами, скомпенсирует частично действие первичного тока, и магнитный поток будет создаваться уже равнодействующим намагничивающим током, как у обычного трансформатора. Этот ток может быть значительно слабее первичного тока, вследствие чего магнитный поток, а следовательно, и напряжение на концах первичной обмотки будут при нагрузке меньше, нежели при разомкнутой вторичной цепи.

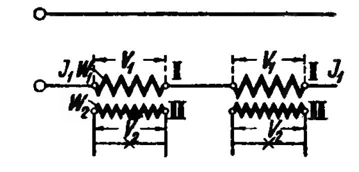


Рис. 181.

На практике сериес-трансформаторы работают часто при постоянном первичном токе. Предположим, что сила первичного тока в линии поддерживается генератором постоянной, каковы бы ни были изменения во вторичной цепи сериес-транформатора. Если пренебречь намагничивающим током, что при небольшом насыщении сердечника трансформатора вполне возможно, то из равенства ампервитков первичной и вторичной обмоток, т. е. из равенства $w_1 I_1 =$

$=w_2 I_2$ следует, что при постоянном первичном токе вторичный ток должен быть также постоянным. Но вторичный ток

$$I_2 = \frac{V_2}{\sqrt{R_2^2 + x_2^2}} = \frac{V_2}{Z},$$

где V_2 — вторичное напряжение, а R_2, x_2, и Z — активное, реактивное и полное сопротивления вторичной цепи.

Пренебрегая падениями напряжения в самом трансформаторе, можно, следовательно, написать

$$V_2 = I_2 Z = V_1 \frac{w_2}{w_1}.$$

Из этого равенства следует, что при постоянном вторичном токе I_2 изменение полного сопротивления вторичной цепи Z влечет за собою изменение вторичного напряжения V_2, а следовательно, и первичного напряжения V_1. Таким образом у сериес-трансформатора, включенного в линию с постоянным по величине током, от нагрузки вторичной цепи зависит величина напряжения как вторичного, так и первичного. В этом отношении сериес-трансформатор как бы противоположен обычному трансформатору, работающему при постоянном первичном напряжении, так как у последнего от вторичной нагрузки зависит величина вторичного и первичного токов.

Свойством сериес-трансформатора, включенного в линию с постоянным по величине током, менять напряжение у первичной обмотки путем изменений сопротивления вторичной цепи можно воспользоваться для целей регулирования полного напряжения линий высокого напряжения реостатами, построенными для низкого напряжения. В самом деле, если во вторичную цепь сериес-трансформатора включить реостат низкого напряжения, то изменение сопротивления его R_2 вызвало бы изменение активного сопротивления первичной цепи так, как будто в первичную цепь был включен непосредственно реостат с сопротивлением $R_1 \frac{w_1}{w_2}$.

Практическое применение сериес-трансформаторов при работе с постоянным током в первичной цепи находит себе место при освещении длинных участков дуговыми фонарями или лампами накаливания током высокого напряжения. Само собою разумеется, что все дуговые фонари в этом случае должны быть одинаковы, так как они питаются одним и тем же током, соответствующим их конструкции. Когда все фонари находятся в действии, первичный ток равен сумме тока вторичной цепи сериес-трансформатора I_2 и намагничивающего тока I_0, т. е. $\overline{I}_1 = \overline{I}_2 + \overline{I}_0$, а общее напряжение линии равно сумме отдельных напряжений первичных обмоток. Если один фонарь погаснет, то напряжение первичной обмотки его трансформатора повысится (ибо он превратится в реактивную катушку с намагничивающим током $I_1 > I_0$). Вследствие этого при неизменном общем напряжении ток линии I_1 понизится, и фонари будут гореть в менее выгодных условиях, чем раньше. Напряжение первичной обмотки при включении фонаря повысится на не-

большую величину только в том случае, когда намагничивающий ток I_0, вообще говоря, мало отличается от полного первичного тока I_1, т. е. когда магнитный поток почти сохраняет свою величину. Практически это условие можно выполнить, взяв сердечник трансформатора с большим магнитным сопротивлением, т. е. или допустив большое магнитное насыщение или, же сделав в нем воздушный промежуток. Следует заметить, однако, что допускать слишком сильный намагничивающий ток у трансформатора невыгодно, так как это заметно понижает $\cos\varphi$ установки. Поэтому берут намагничивающий ток лишь настолько большим, чтобы выключение одного-двух фонарей еще не понижало в значительной степени первичный ток. Часто фонари снабжаются особым приспособлением, которое вводит во вторичную обмотку вместо потухшей дуги эквивалентное ей активное сопротивление.

§ 89. Измерительные трансформаторы.

А. Трансформаторы тока. При измерении переменного тока большой силы пользуются обычно трансформаторами тока (а не шунтами, как при постоянном токе). Первичная обмотка таких трансформаторов включается последовательно в цепь, в которой измеряется ток, а вторичная обмотка включается на амперметр. Таким образом трансформатор тока представляет собою сериес-трансформатор, работающий на вторичную цепь весьма малого сопротивления, т. е. почти с короткозамкнутою вторичною обмоткою. Из рассмотрения работы трансформатора при коротком замыкании (см. главу I) следует, что если пренебречь намагничивающим током при коротком замыкании, то

$$I_1 w_1 = I_2 w_2,$$

или

$$\frac{I}{I_2} = \frac{w_2}{w_1} = \frac{1}{u},$$

откуда

$$I_1 = I_2 \frac{1}{u};$$

здесь u — коэфициент трансформации трансформатора, I_1 и I_2 — первичный и вторичный токи.

Измеряя ток во вторичной цепи I_2 и зная коэфициент трансформации трансформатора, легко определить ток в первичной цепи I_1. Так как речь идет об измерении токов значительной силы амперметром небольшой силы тока, то коэфициент трансформации трансформатора тока всегда (и притом часто значительно) меньше единицы. При средних силах тока (до 250 А) первичная обмотка трансформатора тока представляет собою один-два витка из толстой медной ленты, наложенной на сердечник; при токах 500—1000 А и выше первичная обмотка сводится к толстой шине, проходящей внутри железного кольца, несущего вторичную обмотку.

На рис. 182 изображен трансформатор для токов большой силы в полусобранном виде; медная шина укрепляется между планками

внутри железного кольца. Вторичная обмотка представляет собою обычную катушку из относительно тонкой проволоки. Большинство заводов выполняет вторичную обмотку на ток в 5 A, т. е. рассчитывает на включение во вторичную обмотку амперметра на 5 A; однако некоторые заводы выполняют вторичную обмотку на ток в 10 A или на ток в 2 A. Что касается магнитной цепи трансформатора тока, то она должна быть возможно совершенной, т. е. должна требовать на намагничение незначительный ток, так как только при наличии указанного условия отношение между первичным и вторичным токами практически равно коэфициенту трансформации. В виду этого сердечник трансформатора собирают из лучшего железа возможно тщательнее, избегая стыков, а индукция нормальной работы берется небольшою; последнее желательно еще и в целях устранения искажения формы кривой вторичного тока. Обычно трансформаторы тока работают при индукции 500—1000 гауссов.

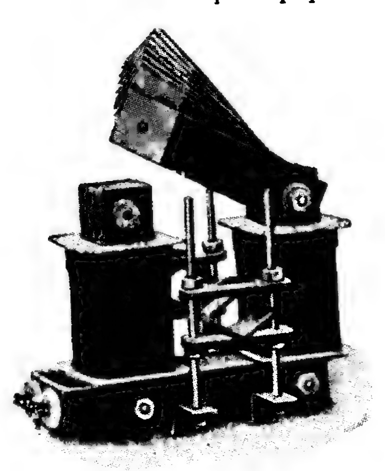


Рис. 182.

Как бы тщательно ни был построен трансформатор тока, все же его коэфициент трансформации для токов несколько меняется при переходе от небольших значений тока к большим. Однако это изменение невелико; современные трансформаторы тока мощностью от 20 до 30 VA могут дать ошибку ниже 1% при токах от 0,2 до 1,25 нормального тока.

В том случае, когда трансформатор тока работает на ваттметр или на счетчик, весьма большое значение имеет фазное смещение вторичного тока, т. е. тока, посылаемого в толстую обмотку ваттметра, относительно первичного тока, который без трансформатора должен был бы непосредственно направиться в ваттметр. Само собою разумеется, фазное смещение токов у трансформатора должно быть по возможности малым. У хороших трансформаторов тока угол смещения токов меньше 20′ или 30′ при нормальной нагрузке и меньше 1° при двойной нагрузке.

Следует заметить, что, так как при разомкнутой вторичной цепи сериес-трансформатор превращается в реактивную катушку с большим намагничивающим током, вследствие чего его магнитный поток, а следовательно, потери в железе и нагрев чрезмерно возрастают, рекомендуется до выключения прибора из вторичной цепи вводить в нее какое-либо небольшое сопротивление или замыкать ее накоротко. Это правило диктуется и тем, что при разомкнутой вторичной цепи сильно возросший магнитный поток может индуктировать в ней значительное напряжение, опасное для ее изоляции.

Трансформаторы тока, включаемые в цепь с напряжением до 50000 V, имеют воздушное охлаждение; включаемые же в цепь с

напряжением выше 50000 V и применяемые на открытых установках имеют обычно масляное охлаждение.

B. Трансформатор напряжения. При измерении напряжения переменного тока свыше 500—600 V или при измерении мощности в установках высокого напряжения применяют так называемые трансформаторы напряжения, которые представляют собою по конструкции почти обычный понизительный трансформатор, но небольшой мощности. Первичная обмотка этого трансформатора соединяется с линией высокого напряжения, а вторичная обмотка—с напряжением, примерно 100 V, подводится к вольтметру, к тонкой обмотке ваттметра, счетчика, реле и т. д. Так как трансформатор напряжения обслуживает измерительные приборы, то по качеству он должен быть несколько отличным от силового трансформатора. В самом деле, применение трансформатора напряжения основано на том, что отношение между электродвижущими силами первичной и вторичной обмоток при холостой работе почти равно отношению напряжений у тех же обмоток, т. е.

$$\frac{E_1}{E_2} \approx \frac{V_1}{V_2} = u = \frac{w_1}{w_2},$$

где u — коэфициент трансформации.

Из диаграммы трансформатора, работающего вхолостую (рис. 81) следует, что если вторичное напряжение равно вторичной электродвижущей силе, то первичное напряжение больше первичной электродвижущей силы на величину падения напряжения в первичной обмотке. Это падение тем больше, чем больше, во-первых, активное сопротивление первичной обмотки, во-вторых, реактивное сопротивление той же обмотки и, в-третьих, ток холостой работы или намагничивающий ток. У трансформатора напряжения, обслуживающего вольтметр, вторичная обмотка включена на обмотку большого сопротивления, и поэтому ток, идущий во вторичной обмотке, весьма мал. Вследствие этого режим работы трансформатора напряжения близок к режиму холостой работы, и для него должно быть выполнено условие наименьшего падения напряжения в первичной обмотке. Так как во вторичной обмотке ток вольтметра все же будет проходить и вызывать в ней падения напряжения, и, следовательно, будет иметь место неравенство между электродвижущей силой и напряжением, необходимо, чтобы сопротивление вторичной обмотки трансформатора было по возможности мало.

Активные сопротивления обмоток трансформатора, вообще говоря, малы и могут быть уменьшены у трансформатора напряжения надлежащим подбором сечения проводников обмотки. Реактивные сопротивления от потоков рассеяния могут быть уменьшены возможным сближением первичной и вторичной обмоток или делением их на катушки и поочередным и более тесным расположением последних на сердечниках. Намагничивающий ток трансформатора напряжения ослабляется, во-первых, применением наиболее совершенного легированного железа толщиною в 0,3 *мм*, дающего к тому же наименьшие потери на гистерезис и токи Фуко, во-вторых, небольшой индукцией в железе (7000—9000), и, в-третьих, тщательной сборкой сердечника.

Следует заметить, что трансформатор напряжения довольно чувствителен к изменению первичного напряжения, т. е. если трансформатор напряжения построен и вольтметр, с ним работающий, проградуирован на определенное первичное напряжение, то при другом напряжении (в особенности высшем) вольтметр может дать не совсем точные показания, что происходит от изменения коэфициента трансформации. Последнее понятно, так как с изменением напряжения меняется намагничивающий ток, а с ним и падение напряжения в обмотках. По той же причине и изменение частоты влияет на точность показания вольтметра, работающего с трансформатором напряжения.

Выше было замечено, что с вторичною обмоткою трансформатора напряжения может быть соединен не один вольтметр, а несколько, или же соединены тонкие обмотки реле, фазные лампы и т. д. В таком случае нагрузка трансформатора уже не может считаться ничтожной, и возникает вопрос о постоянстве коэфициента трансформации. Само собою понятно, что он не будет сохранять свое значение с увеличением числа приключаемых приборов. Разные заводы дают в этом отношении неодинаковые гарантии; например, для трех типов трансформаторов с полною мощностью 25, 100 и 200 VA одного из иностранных заводов дается ошибка ниже 1% при мощностях соответственно 15 (это приблизительное потребление теплового вольтметра в 100 V), 45 и 100 VA и ошибка 2,5—3% при полных нагрузках.

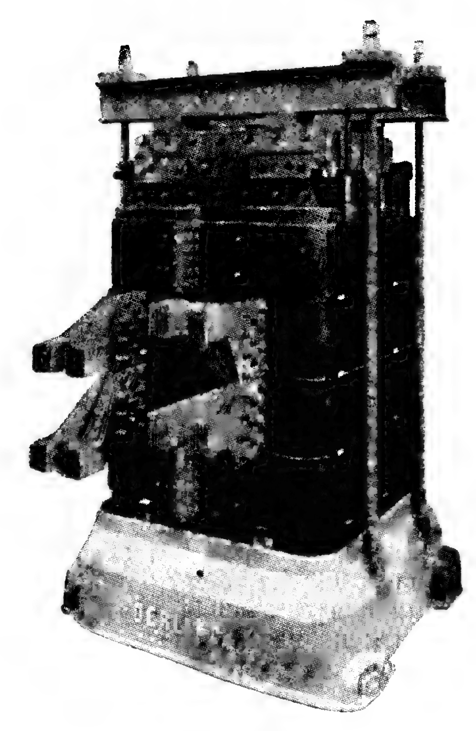

Рис. 183.

В том случае, когда трансформатор напряжения работает в соединении с ваттметром или счетчиком, часто говорят о фазном смещении вторичного напряжения относительно первичного напряжения. Под этим смещением подразумевается угол между первичным напряжением и вторичным напряжением. Если бы у трансформатора не было падений напряжения, то первичное напряжение расходилось бы по фазе с вторичным ровно на 180°; можно было бы сказать, что угол смещения их равен нулю. Но и при холостой работе трансформатора в его первичной обмотке имеются падения напряжения, вследствие чего вторичное напряжение отстает от первичного на угол, превышающий 180°, т. е. на угол $180° + \gamma$; углом смещения в этом случае называют угол γ. При нагрузках угол первичного и вторичного напряжений больше, нежели при холостой работе; кроме того этот угол тем меньше, чем меньше сопротивления обмоток трансформатора и чем слабее намагничивающий ток, т. е. он зависит от тех же факторов, от которых зависит и коэфициент трансформации. Так как по отношению к ваттметрам имеет значение именно смещение напряжений, то о качестве трансформатора напряжения часто и судят как по изменению коэфициента трансформации, так и по изменению угла смещения.

На рис. 183 показан обычный вид трансформатора напряжения на напряжение 2000—10 000 V.

§ 90. Трансформаторы для токов большой силы.

Некоторые электрохимические процессы, как то: электроплавка, электросварка, получение карбида кальция и другие требуют трансформаторов, дающих весьма значительные (до 50 000 А) силы тока во вторичной цепи при относительно невысоком напряжении. Конструкция таких трансформаторов определяется особенностью их работы, заключающейся в том, что почти все такие трансформаторы работают при весьма неспокойной нагрузке, сопровождающейся быстрыми перегрузками и короткими замыканиями со стороны вторичной цепи. Кроме того и значительные токи вторичной обмотки придают конструкции последней и всего трансформатора специфические особенности. Быстрые перегрузки и короткие замыкания вызывают чрезмерные механические воздействия на обмотки, и потому последние у рассматриваемых трансформаторов должны быть особо тщательно и солидно укреплены на сердечниках. Точно так же должны быть надежно укреплены выводы вторичной цепи; так как при значительных токах механические силы, действующие между ними, могут быть значительны. Быстрые перегрузки требуют к тому же и усиления изоляции концевых витков обмотки высокого напряжения во избежание порчи их от перенапряжения.


Рис. 184.

Для того, чтобы ослабить толчки тока, и для того, чтобы обеспечить спокойное горение дуги, если речь идет о дуговых печах, трансформатор должен иметь некоторое определенное, повышенное сравнительно с обычным, падение от реактивного сопротивления (6—8%). Последнее достигается увеличением воздушного зазора между концентрическими первичными и вторичными катушками, что к тому же улучшает условия охлаждения трансформатора. Вторичная обмотка изготовляется из полос электролитической, по возможности однородной, меди, причем особое внимание уделяется соединениям между отдельными витками; подлежащие соединению концы сначала оцинковываются, затем склепываются и наконец лудятся. Плохой контакт между концами влечет за собою нагрев их, плавление полуды и возможность воспламенения изолирующих прокладок; по этой же причине все соединения следует периодически осматривать. Если вторичная обмотка состоит из нескольких

параллельных ветвей, то необходимо наблюдать за тем, чтобы все эти ветви были одинаково нагружены при всех условиях работы.

Регулировка вторичного напряжения трансформатора для электроплавки производится со стороны высокого напряжения, или выключением и включением части витков первичной обмотки, или помощью потенциального регулятора, включенного перед первичною обмоткою. В последнем случае главный трансформатор и потенциальный регулятор конструируются в одно целое.

На рис. 184 изображен однофазный трансформатор мощностью 4450 kVA при частоте 25 Hz и напряжении 15 000/115 до 155 V; вторичный ток 28 700 А. Первичная обмотка этого трансформатора состоит из 492 витков; ее катушки расположены ближе к сердечнику. Вторичная обмотка состоит из восьми, выполненных из электролитической полосовой меди, витков, соединенных в две параллельные ветви. Первичная и вторичная обмотки разделены миканитовым цилиндром.

§ 91. Сварочные трансформаторы.

Сварочные трансформаторы подразделяются на трансформаторы, работающие теплом сопротивления, и на трансформаторы, работающие теплом вольтовой дуги. Первые трансформаторы имеют вторичное напряжение, не превышающее 1—3 V; такое напряжение достаточно для того, чтобы прогнать через свариваемые части значительной силы ток, который в сопротивлении контакта этих частей освобождает необходимое количество тепла для сварки. В виду небольшого вторичного напряжения вторичная обмотка таких трансформаторов состоит всего из одного витка, конструктивно связанного со сварочным аппаратом в одно целое. На рис. 185 изображен сварочный аппарат для сварки швов. Как видно из рисунка, вторичная обмотка имеет один виток, а первичная снабжена ответвлениями для изменения коэфициента трансформации, следовательно, для изменения силы сварочного тока.

Сварочные трансформаторы, работающие теплом вольтовой дуги, имеют вторичное напряжение около 40—75 V, достаточное для поддержания вольтовой дуги при определенной силе тока. Так как работа этих трансформаторов сопровождается неизбежным коротким замыканием вторичной цепи в момент зажигания дуги, то они должны быть снабжены дополнительным приспособлением, ограничивающим ток короткого замыкания. Таким приспособлением является реактивная катушка, которая может быть совершенно отдельной частью установки или же может составлять одно целое с трансформатором. На рис. 186 изображена схема сварочной установки завода ВЕКС, в которой трансформатор *1* снабжен отдельной реактивной катушкой *2* с регулируемым сопротивлением магнитной цепи. Регулировкой магнитного сопротивления реактивной катушки изменяют индуктивное сопротивление ее, что позволяет устанавливать необходимую силу тока короткого замыкания и получать ниспадающую внешнюю характеристику.

На рис. 187 изображено схематическое устройство трансформатора для дуговой сварки Гольслега. Этот трансформатор состоит

из трех сердечников *A*, *B* и *C*, из которых сердечник *C* не несет обмотки и не примыкает вплотную к ярму двух других сердечников. На сердечнике А имеется первичная обмотка *I* и вторичная

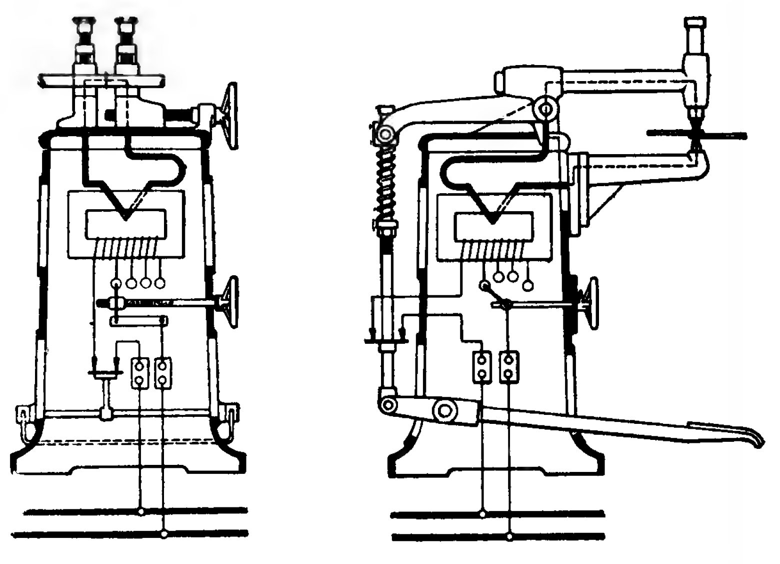


Рис. 185.

обмотка *II*; на сердечнике *B* имеется одна обмотка *Dr*, последовательно соединенная со вторичной обмоткой *II*. Обмотка *Dr* есть в сущности реактивная катушка, имеющая общую магнитную цепь со вторичной обмоткой *II*. В самом деле, при прохождении тока

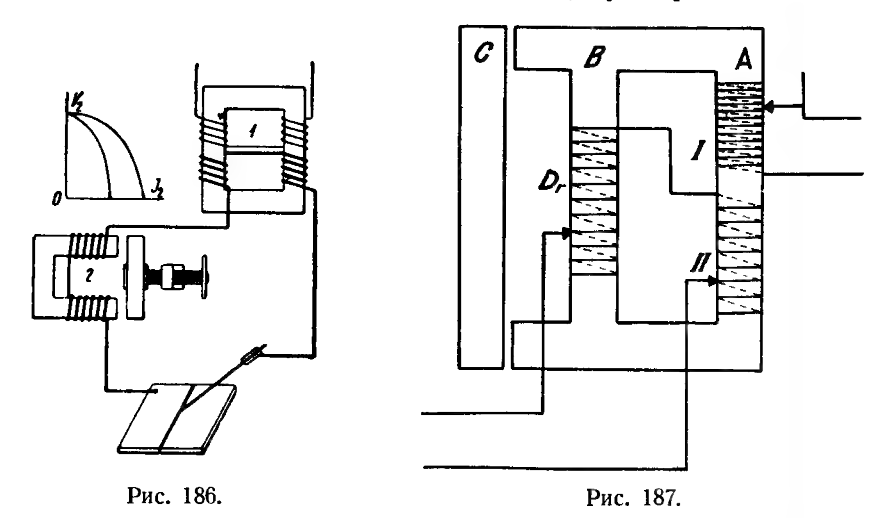


Рис. 186. Рис. 187.

во вторичной цепи вторичный магнитный поток катушки *Dr* не полностью компенсируется; часть этого потока как бы отжимается к сердечнику *C* и через него замыкается. Благодаря этому индук-

тивное сопротивление катушки *Dr* получается значительным, т. е. она работает как реактивная катушка.

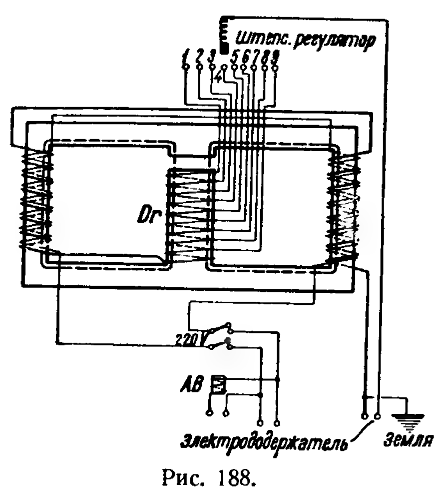


Рис. 188.

При наличии выводов у обмоток и устройства, дающего возможность менять междужелезное пространство между сердечником *C* и ярмом трансформатора, нетрудно получить разные комбинации в отношении напряжения и тока короткого замыкания, необходимые при той или иной дуговой сварке.

На рис. 188 схематически изображен сварочный трансформатор, изготовляемый AEG. У него дополнительная катушка *Dr* помещена на среднем стержне, отделенном с одной стороны от ярма сердечника воздушным зазором. Эта катушка снабжена выводами *1—9*, которые дают возможность устанавливать тот или иной сварочный ток. Переставляя штепсель по контактам *1—9*, можно получить следующие значения сварочного тока: *1*—90 A, *2*—100 A, *3*—115 A, *4*—135 A, *5*—150 A, *6*—175 A, *7*—200 A, *8*—250 A и *9*—300 A. Положение штепселя на контакте *1* дает небольшой ток, так как в сварочную цепь вводятся все витки катушки *Dr*, обеспечивающие наибольшее индуктивное сопротивление. Действие катушки *Dr* основано на появлении при нагрузке усиленного поля рассеяния вторичных обмоток, находящихся на крайних стержнях, и потока, создаваемого самою катушкою *Dr* (см. на рисунке пути замыкания поля рассеяния при нагрузке). В первичной цепи трансформатора имеется электромагнитный выключатель *AB*, действующий от кнопки на электродержатель и позволяющий выключать трансформатор, как только сварка закончена. Первичное напряжение у рассматриваемого трансформатора 220 V, вторичное напряжение при холостой работе 110 V, коэфициент трансформации при работе не меняется.

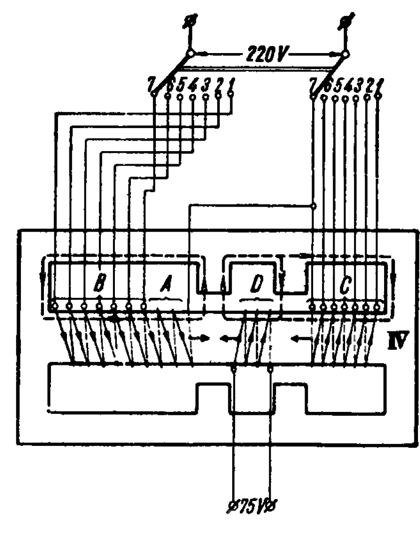


Рис. 189.

На рис. 189 схематически изображен сварочный трансформатор Сименс-Шуккерт. У этого трансформатора нет отдельной катушки, играющей роль реактивной катушки. Усиленная реактивность трансформатора при нагрузке создается путем увеличения полей рассеяния первичной и вторичной обмоток, благодаря наличию в средних частях сердечника выступов, облегчающих прохождение силовых линий поля рассеяния. Изменение реактивности трансформаторов, необходимое для получения разных сил сварочного тока, достигается изменением числа витков первичной обмотки. Для того чтобы при этом не менялся коэфициент трансформации, первичная обмотка разбита на три части: на основную *A* и две дополнительные *B* и *C*, снабженные выводами и расположенные по обеим сторонам вторичной обмотки *D*. Дополнительные обмотки *B* и *C* намотаны в разные стороны, благодаря чему их ампервитки взаимно компенсируются и не влияют на главный поток, пронизывающий вторичную обмотку. Поля же рассеяния с увеличением числа витков дополнительных обмоток возрастают, а потому возрастает и общая индуктивность первичной цепи. Изменение числа витков первичной обмотки достигается перемещением двухполюсного переключателя, изображенного на рис. 189 сверху. При одном и том же напряжении холостой работы $V_2 = 75$ V и при разных положениях переключателя сила сварочного тока будет при положении переключателя *1*—95 A, *2*—120 A, *3*—145 A, *4*—170 A, *5*—185 A, *6*—190 A и *7*—195 A. Первичное напряжение 220 V.

Следует отметить, что из-за большой индуктивности сварочные трансформаторы имеют весьма невысокий коэфициент мощности; он колеблется в пределах 0,25—0,4.

§ 92. Трансформаторы для индукционных печей.

Кроме дуговых печей, для целей электроплавки часто применяют индукционные печи, основанные на том принципе, что пульсирующий магнитный поток в частичках металла индуктирует токи, которые доводят металл до температуры плавления. Одна из таких печей (Челлина) схеметически представлена на рис. 190. Эта печь состоит из железного сердечника *A* с надвинутой на него первичною катушкою *B* и кольцевой ванны из огнеупорного материала с засыпаемым в нее подлежащим к плавке металлом *C*. Этот металл играет роль вторичной обмотки по отношению к первичной обмотке *B*. Таким образом все устройство представляет собою в сущности трансформатор с короткозамкнутою вторичною обмоткою.

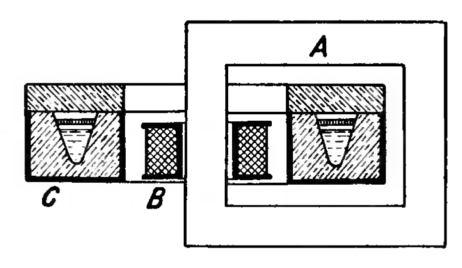


Рис. 190.

Наиболее совершенною индукционною печью является печь Рохлинга-Роденгаузера, изображенная в поперечном разрезе на рис. 191a и в продольном разрезе на рис. 191b. Эта печь, предназначенная для питания однофазным током, состоит из железного сердечника *H—H*, на вертикальные звенья которого насажены обычная первичная обмотка высокого напряжения (до 5000 V) *A—A* и вторичная обмотка *B—B* (рис. 191b), выполненная из медных лент большого сечения и дающая весьма низкое напряжение при боль-

шой силе тока. Концы вторичной обмотки подведены к железным полюсным пластинам $E-E$, заделанным в обмуровку ванны для металла $F-F$.

Во избежание сильного нагрева обмотки к ним подводится охлаждающий воздух по трубам N_1-N_1. Сама ванна выполняется из толстого железа, служащего внешнею оболочкою, и внутренней обмуровки указанной на рисунке формы. В выемках $C-D-C$, имеющих вид восьмерки, размещается расплавляемая масса. Тепло, необходимое для плавки массы, сообщается, во-первых, индукти-

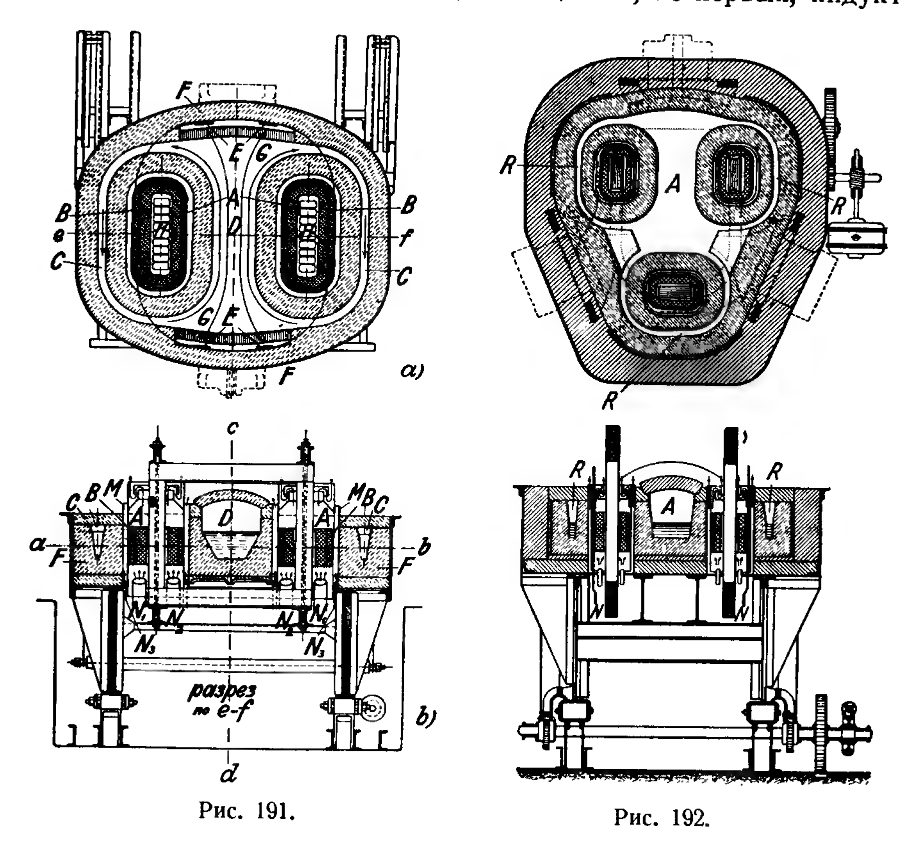


Рис. 191. Рис. 192.

рующимися в ней токами Фуко, так как она служит как бы вторичною обмоткою трансформатора, аво-вторых — сильными токами вторичной обмотки $B-B$, которая посылает их в массу через полюсные пластины $E-E$, как только ванна нагреется и набивка $G-G$, выполняемая из проводников второго рода,[1] будет пропускать ток. Таким образом, в первый период плавки печь работает как чисто индукционная, а во второй период — как печь индукционная и как печь сопротивления. Изображенная на рис. 191*a* и 191b печь предназначена для плавки массы в 5 *т* и для работы при напряжении 5000 V и при частотере 15 Hz.

На рис. 192a и 192b изображена индукционная печь Рохлинга-Роденгаузера трехфазного тока. Трансформатор этой печи имеет три сердечника, на которые наложены первичные и вторичные обмотки, причем концы вторичной обмотки присоединены к железным пластинам, заделанным в обмуровку ванны. Обмотки интенсивно охлаждаются подводимым извне воздухом.

[1] Проводниками второго рода называют проводники, которые при низкой температуре не проводят тока, но при высокой температуре нагрева их становятся проводниками.

§ 93. Реакторы.

Реактором называется прибор, предназначенный для создания в электрической цепи искусственного реактивного сопротивления. Реакторы распадаются на две группы: на реакторы с железом, которые в общежитии называются реактивными катушками, и на реакторы без железа. Первые реакторы представляют собою катушку из изолированной проволоки, надетую на железный сердечник, обычно имеющий один или два разрыва в виде воздушной щели. Часто имеется приспособление для изменения ширины этой щели. Вторые реакторы представляют собою также катушку из проводников, но заделанную в бетон и механически достаточно сильно укрепленную (рис. 193).

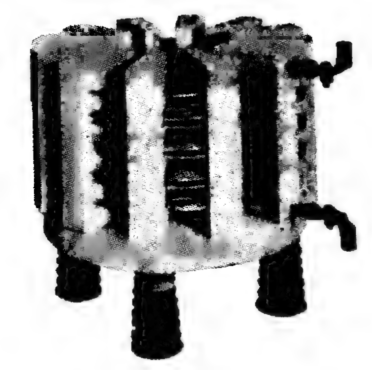
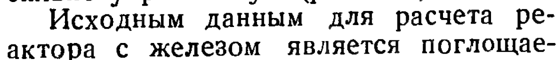


Рис. 193.



Исходным данным для расчета реактора с железом является поглощаемое им напряжение при определенном токе. Если, например, реактор должен поглотить напряжение V при токе I, то необходимый магнитный поток и необходимое число витков находится из равенства

$$V = 4{,}44 f w \Phi \cdot 10^{-8} \text{ вольт},$$

где f — частота тока, Φ — магнитный поток, w — число витков катушки.

Магнитный поток определяет размеры сердечника и, следовательно, вес железа; число же витков катушки определяет вес меди. Относительное количество железа и меди устанавливается в зависимости от наименьшей стоимости и наименьших потерь. Чтобы избежать больших потерь в железе, необходимо выбрать подходящую индукцию в нем. Она берется обычно несколько ниже, чем у трансформаторов.

Число витков катушки при заданном токе зависит от магнитного сопротивления магнитной цепи. Если пренебречь сопротивлением железной части ее (что практически вполне возможно) и принять во внимание только сопротивление воздушных щелей, то число витков катушки определится из равенства:

$$Iw = 0{,}8\,\delta B,$$

где B — индукция в воздушной щели, δ — общая длина щелей в сантиметрах.

Обозначая через Q сечение щели в квадратных сантиметрах, получаем:

$$Iw = 0{,}8\,\delta\,\frac{\Phi}{Q} = 0{,}8\,\delta\,\frac{V\cdot 10^8}{4{,}44\cdot fwQ}.$$

При определении сечения щели Q следует иметь в виду довольно сильное рассеяние около щели. Если Q' — сечение разорванного щелью сердечника, то

$$Q = \frac{Q'}{K},$$

где K — коэфициент, меньший единицы. При узких щелях его можно принять равным 0,9, а при широких щелях 0,5—0,6.

Расчет катушек производится совершенно так же, как и у трансформаторов. Охлаждение реакторов может быть воздушное или масляное. Реакторы с железом применяются для регулирования напряжения преобразователей переменно-постоянного тока, для получения спокойного горения дуговых ламп, для компенсации емкости в линиях (например катушки Пупина в телефонных линиях) и т. д.

У реактора без железа обмотка, как было указано, размещается на сердечнике из немагнитного материала. У небольших реакторов в качестве сердечника применяется фарфоровый ребристый цилиндр; у больших реакторов, применяемых в качестве ограничителей тока в линиях передач или на силовых станциях, сердечник — сборный с фарфоровыми или деревянными стойками и прокладками (рис. 193). Обмотка таких реактôров состоит из витков, намотанных в виде длинного цилиндра, или же составляется из плоских катушек, имеющих вид спиралей с утопленными в фарфор проводниками. Одним из требований, предъявляемых к реактору, служащему ограничителем тока, является прямая пропорциональность напряжения на концах катушки проходящему по ней току. Так как железо обладает способностью насыщаться и нарушать пропорциональность между напряжением и током катушки, то оно по этой причине и не применяется для реакторов — ограничителей тока.

§ 94. Вопросы для самопроверки.

1. Как работает сериес-трансформатор?
2. Каковы особенности устройства измерительных трансформаторов.
3. Каковы особенности устройства трансформаторов для токов большой силы?
4. Каковы особенности устройства сварочных трансформаторов?
5. Каковы особенности устройства трансформаторов для индукционных печей?
6. Как устроены реакторы?

ГЛАВА ДВАДЦАТЬ ПЕРВАЯ.

ЯВЛЕНИЯ ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ, ВЫКЛЮЧЕНИИ И КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ ТРАНСФОРМАТОРА.

Явления, имеющие место в трансформаторе при его включении или при внезапном коротком замыкании, представляют собою явления неустановившегося состояния, продолжающиеся всего лишь доли секунды. Несмотря на незначительную длительность этих явлений, изучение их крайне необходимо, так как последствия их, если не принять определенных противомер, могут вывести из строя самый трансформатор или приборы, включенные в его цепь. Не задаваясь целью детально изложить теорию упомянутых выше явлений, мы ограничимся в дальнейшем лишь главнейшими моментами этой теории.

§ 95. Явления при включении трансформатора.

Трансформатор, включаемый в цепь при разомкнутой вторичной цепи, во всем подобен обычной реактивной катушке с железом. Предположим предварительно, что реактивная катушка не имеет железного сердечника, а активное сопротивление ее обмотки ничтожно мало и им можно пренебречь. При установившемся режиме магнитный поток реактивной катушки меняется согласно основному закону электромагнитной индукции:

$$v = w\frac{d\Phi}{dt}\cdot 10^{-8},$$

где v — мгновенное значение приложенного напряжения, w — число витков катушки, $d\Phi$ — изменение за время dt пронизывающего катушку магнитного потока.

Полное изменение магнитного потока за какой-либо промежуток времени t, отсчитываемого от нулевого значения потока, выразится суммою изменений за тот же промежуток времени и будет равно

$$\Phi_t = \int_0^t d\Phi = \int_0^t \frac{vdt}{w}\cdot 10^8.$$

Поток Φ_t представляет собою поток, который пронизывает катушку в момент времени t. Он является интегральной функцией приложенного напряжения. Следовательно, если напряжение меняется по синусоидальной кривой, то и магнитный поток будет меняться также по синусоидальной кривой со сдвигом по фазе на $^1/_4$ периода. При неустановившемся режиме включения магнитный поток реактивной катушки меняется согласно тому же основному закону электромагнитной индукции, но форма кривых изменения его во времени зависит от момента включения катушки на первичную сеть.

Предположим, что первичное напряжение меняется по синусоидальной кривой V_1 и катушка включена в момент прохождения

напряжения через наибольшее значение (рис. 194а). В первый момент включения магнитный поток равен нулю. Но он тотчас же начнет нарастать по кривой, которая является интегральной кривой напряжения V_1, на рис. 194а по кривой Φ_y. Начиная с нулевого значения, поток будет нарастать до тех пор, пока напряжение имеет положительное значение, т. е. до момента нулевого значения напряжения. В этот момент магнитный поток достигнет наибольшего значения и начнет уже убывать. Совершенно ясно, что изменение магнитного потока будет в рассматриваемом случае происходить по той же синусоидальной кривой, что и при установившемся режиме с отставанием от напряжения на $^1/_4$ периода. Так как предполагается, что железа в реактивной катушке нет, то намагничивающий ток в своем изменении будет совпадать по фазе с магнитным потоком, т. е. будет меняться по синусоидальной кривой, совпадающей с кривой потока, на рис. 194*a* по кривой i_y.

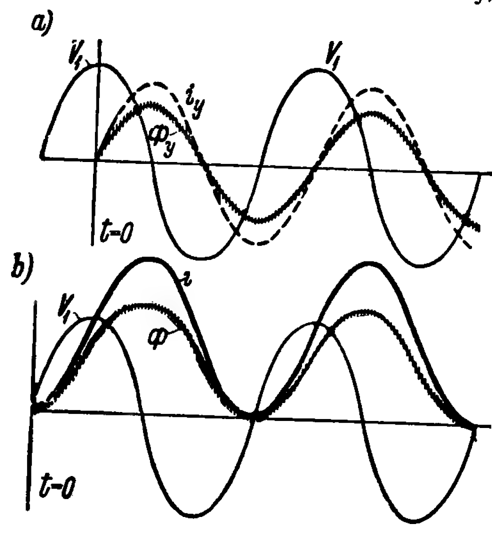


Рис. 194.

В виду того, что нарастание магнитного потока при рассматриваемом включении такое же, что и при установившемся режиме, ток включения будет равен установившемуся току.

Предположим теперь, что катушка включается в момент прохождения напряжения через нуль (рис. 194b). Начиная с этого момента, магнитный поток катушки будет нарастать до тех пор, пока приложенное напряжение не сделается равным нулю, т. е. в течение полупериода. Увеличение потока прекратится в момент прохождения напряжения через нуль. В течение следующего полупериода поток будет убывать, пока напряжение не изменит своего направления. Изменение магнитного потока в этом случае изобразится на рис. 194b кривой Ф, а изменение намагничивающего тока кривою i. Так как кривая магнитного потока Ф в период его нарастания является интегральной кривой за полупериод, а не за $^1/_4$ периода, как в первом включении, то ясно, что наибольшее значение ординаты кривой Ф, а следовательно, и кривой i, вдвое больше соответствующих значений ординат кривых Φ_y и i_y. Это значит, что

ток включения реактивной катушки без железа в момент прохождения напряжения через нуль вдвое больше тока включения той же катушки в момент прохождения напряжения через наибольшее значение.

Если бы активное сопротивление катушки было действительно равно нулю, то магнитный поток и, следовательно, ток пульсировали бы неопределенно долгое время, не меняя своих знаков, т. е. ток в цепи катушки был бы пульсирующим постоянного направления.

Намагничивающий ток i (так же, как и магнитный поток Ф) в рассматриваемом случае включения мы можем представить себе как бы сложенным из тока i_y установившегося режима и постоянного тока i_n, равного наибольшему значению установившегося тока i_y (рис. 195), т. е. при включении катушки на намагничивающий ток установившегося режима i_y как бы накладывается постоянный ток i_n.

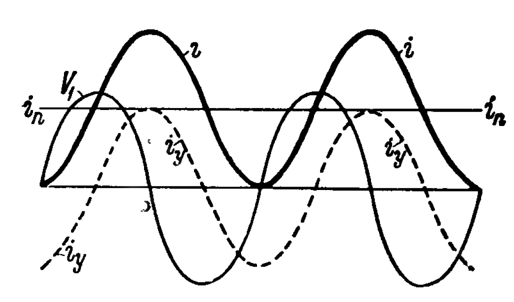


Рис. 195.

Наше предположение, что активное сопротивление катушки равно нулю, не совпадает с действительностью. Наличие активного сопротивления быстро снижает постоянный ток i_n до нуля, вследствие чего ток включения постепенно переходит в ток установившегося состояния.

В том случае, когда катушка включается в промежуточный момент между наибольшим и нулевым значениями напряжения, кривая тока включения по виду своему занимает среднее положение между кривыми тока рассмотренных случаев включения.

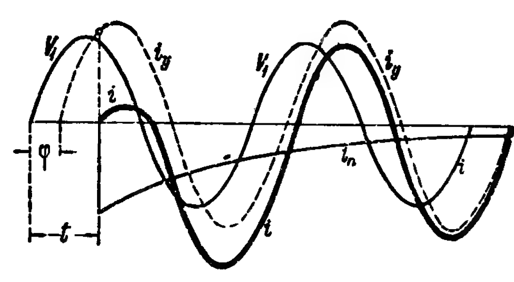


Рис. 196.

На рис. 196 изображена кривая тока включения i в предположении, что включение произошло спустя период времени t после прохождения напряжения V_1 через нуль, и что активное сопротивление катушки не равно нулю. Легко видеть, что ток включения в этом случае уже не является пульсирующим, постоянным по направлению, но он и не переменный симметричный ток установившегося режима. Этот ток мы можем рассматривать как результат сложения двух токов: тока установившегося режима, меняющегося по кривой i_y, и тока постоянного по направлению, убывающего по кривой i_n. Суммы ординат кривых i_y и i_n дают ординаты кривой i. Величины токов i_y и i_n, а также время, в течение которого постоянный ток исчезает и ток включения переходит в установившийся ток, зависит от величины активного сопротивления катушки R и коэфициента самоиндукции L.

Чтобы учесть количественную сторону явления, напишем равенство

$$vidt = Ri^2\,dt + i\frac{dLi}{dt}\,dt.$$

В этом равенстве $vidt$ — энергия, подводимая к катушке; Ri^2dt — энергия, теряемая на нагрев сопротивления R; $i\frac{dLi}{dt}dt$ — энергия, накопляемая магнитным полем реактивной катушки.

Из написанного равенства получаем известное равенство электродвижущих сил

$$v = Ri + \frac{dLi}{dt}.$$

Интеграл этого равенства при постоянном значении L будет

$$i = \frac{1}{L}e^{-\frac{Rt}{L}}\int ve^{+\frac{Rt}{L}}dt + Ce^{-\frac{Rt}{L}};$$

здесь e — основание натуральных логарифмов, а C — постоянная.

Если напряжение v во времени не меняется, т. е. к цепи подведено напряжение источника постоянного тока, то, как следует из последнего равенства,

$$i = \frac{v}{R} + Ce^{-\frac{Rt}{L}}.$$

Постоянная C определяется условиями начального момента. В момент $t = 0$ ток $i = 0$; следовательно

$$C = \frac{v}{R}.$$

Поэтому выражение для тока i получает вид

$$i = \frac{v}{R}(1 - e^{-\frac{Rt}{L}}) = \frac{v}{R} - \frac{v}{R}e^{-\frac{Rt}{L}} = i_y - i_n.$$

Это выражение показывает нам, что ток в цепи нарастает по экспоненциальной кривой (рис. 197) и что этот ток можно представить как равнодействующий из тока установившегося режима $i_y = \frac{v}{R}$ и тока переходного режима $i_n = \frac{v}{R}e^{-\frac{Rt}{L}}$, исчезающего по экспоненциальной функции $e^{-\frac{Rt}{L}}$. Мерою скорости исчезновения последнего тока служит отношение $\frac{L}{R} = T$, называемое постоянной времени; обратное отношеие $\frac{R}{L}$ называется коэфициентом затухания.

Если напряжение v во времени меняется по синусоиде, например, $v = V_m \sin \omega t + \alpha$, где V_m — амплитуда, а $V_m \sin \alpha$ — напряжение в момент замыкания цепи, то для тока i получится выражение

$$i = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}\sin(\omega t + \alpha - \varphi) + Ce^{-\frac{t}{T}}.$$

Здесь φ — угол сдвига фаз между током и напряжением, вызванный постоянными обмотки трансформатора, причем $\operatorname{tg}\varphi = \frac{L\omega}{R}$, или $\varphi = \operatorname{arctg}\frac{L\omega}{R}$.

Так как в момент включения, т. е. при $t = 0$, ток $i = 0$, то

$$C = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}\sin(\varphi - \alpha).$$

Легко видеть, что в данном случае ток i является равнодействующим двух токов: во-первых, тока установившегося режима

$$i_v = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}\sin(\omega t + \alpha - \varphi),$$

который отстает от напряжения V на угол, равный $\varphi = \operatorname{arctg}\omega T$, и, во-вторых, тока переходного режима

$$i_n = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}e^{-\frac{t}{T}}\sin(\varphi - \alpha),$$

который с течением времени постепенно уменьшается до нуля. Наибольшая величина этого тока, именно

$$i_{n\cdot m} = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}},$$

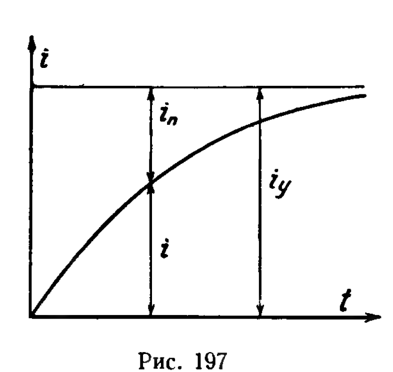


Рис. 197

имеет место при условии существования, во-первых, равенства

$$e^{-\frac{t}{T}} = e^{-\frac{Rt}{L}} = 1,$$

что будет, например, при $R = 0$, и, во-вторых, равенства

$$\sin(\varphi - \alpha) = 1,$$

что будет при $\alpha = 0$, т. е. в случае, когда $V_m \sin \alpha = 0$, когда, следовательно, цепь включается в момент перехода напряжения через нуль.

Действительный трансформатор, включаемый на первичную сеть вхолостую, отличается от рассмотренной реактивной катушки тем, что он обладает весьма большим коэфициентом самоиндукции и имеет железный сердечник. Наличие же железа в значительной мере увеличивает ток включения. В самом деле, пусть включение произошло в момент прохождения напряжения через нуль. Магнитный поток должен увеличиться в этом случае до двойного своего значения установившегося режима. Следовательно, должна удвоиться индукция в железе, что приведет к сильному насыщению его и большому магнитному сопротивлению. Последнее обстоятельство имеет следствием чрезмерное возрастание намагничивающего тока включения.

У современных трансформаторов, в особенности с искусственным охлаждением, магнитная цепь берется с большим насыщением, и потому броски тока при включении должны быть большими. Осциллограммы токов включения современных трансформаторов показывают, что броски тока превосходят амплитуду нормального намагничивающего тока раз в 100—120. Так как нормальный намагничивающий ток составляет 5—10% нормального тока нагрузки, то броски тока при включении могут превосходить нормальный ток нагрузки в 8—12 раз. Такие токи опасны для приборов, включенных в цепь трансформатора, и нежелательны для сети, к которой подключается трансформатор. Нежелательны они и для самого трансформатора из-за тех механических усилий, которые получаются между катушками обмотки. В силу кратковременности эти токи не опасны в тепловом отношении.

Чтобы иллюстрировать сказанное о включении трансформатора, на рис. 198 приведены осциллограммы токов включения одного

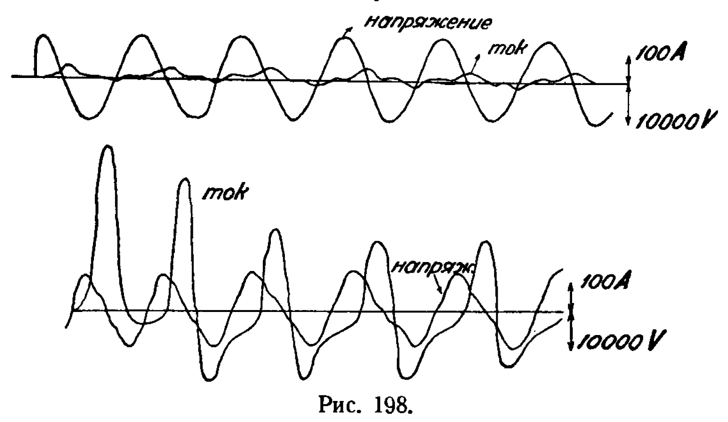


Рис. 198.

трансформатора, причем первая осциллограмма отвечает случаю включения при переходе напряжения через наибольшее значение, т. е. через амплитуду его, а вторая осциллограмма—случаю включения при переходе через нуль.

С целью ослабить ток включения применяют рубильники с так называемыми предварительными контактами, с помощью которых в первый момент в цепь трансформатора вводится большое сопротивление, замыкаемое накоротко при дальнейшем движении ножа рубильника.

Кроме явления неустановившегося тока, при включении трансформатора имеют место явления неустановившегося напряжения, которые часто ведут к чрезмерному повышению напряжения между соседними витками обмотки и между зажимами трансформатора. Причина этих явлений лежит в свободных колебаниях, возникающих в цепи, состоящей или из емкости линии и самоиндукции самого трансформатора, когда последний включается с подключенной к линии вторичною обмоткою, или из емкости самого трансформатора и его же самоиндукции, когда включается одна обмотка высшего напряжения, имеющая довольно большую емкость. Математическим анализом свободных колебаний нетрудно показать, что эти колебания можно рассматривать как равнодействующие бегущих волн с крутым фронтом, перемещающихся по цепи в противоположные стороны с весьма большой скоростью, причем взаимный сдвиг их и высота фронта зависят от того, в какой момент изменения напряжения включается трансформатор. Бегущая волна, перемещаясь по обмотке трансформатора, дает между витком, над которым в данный момент расположился фронт волны, и следующим за ним витком напряжение, значительно превосходящее то напряжение, которое имеется между витками при установившемся состоянии. Если включение трансформатора происходит в момент перехода напряжения сети через наибольшее значение (амплитуду), то высота фронта волны, а следовательно, и напряжение между соседними витками может достигнуть величины амплитуды напряжения сети, т. е. в десятки раз превосходить нормальное напряжение между витками, равное $\frac{V}{w}$, где w — число витков обмотки. Для трансформаторов низкого напряжения, у которых запас диэлектрической прочности изоляции велик в сравнении с обслуживаемым напряжением, такое перенапряжение между витками неопасно; оно опасно для трансформаторов высокого напряжения, у которых изоляция работает ближе к пробивному напряжению. Средством борьбы с пробоями от местных перенапряжений является усиление изоляции первых витков обмотки и включение перед обмоткою реактивной катушки.

Кроме местного перенапряжения, бегущие волны при благоприятных к тому условиях включения могут дать перенапряжение и на зажимах обмотки, достигающее двойной величины нормального напряжения.

§ 96. Явления при выключении трансформатора.

Явления при выключении трансформатора во многом зависят от условий разрыва цепи, а именно: от состояния и рода контактов включателя, от скорости разрыва цепи, от среды, в которой происходит разрыв цепи, и т. д.

Время исчезновения тока в цепи зависит не только от скорости расхождения контактов выключателя, но и от скорости, с какою гаснет вольтова дуга, образующаяся между расходящимися контактами. У плохо сконструированных выключателей после фактического разрыва цепи ток в ней поддерживается еще несколько периодов через вольтову дугу. Наличие же вольтовой дуги, вызывающей свободные колебания, может привести к значительному перенапряжению у трансформаторов высокого напряжения, емкость обмоток которых довольно велика. Однако и в том случае, когда выключение не сопровождается заметной вольтовой дугой, например у масляных выключателей, может получиться у обмотки большое перенапряжение, на этот раз вследствие быстрого убывания тока, т. е. вследствие значительно превосходящей нормальную величину отношения $\frac{di}{dt}$; быстро убывающее поле индуктирует

в этом случае большое напряжение в обмотке трансформатора.

Опасные перенапряжения возникают в трансформаторе и тогда, когда он, будучи присоединен к одному лишь генератору (а не к шинам станции), сразу будет выключен при полной нагрузке со стороны высокого напряжения, т. е. со стороны вторичной цепи. Дело в том, что современные трансформаторы и при нормальном для них напряжении работают с довольно сильным насыщением; если же это напряжение значительно повысится, как это имеет место в данном случае при сбрасывании нагрузки с генератора, в особенности турбогенератора с его почти прямолинейной кривой намагничения, то насыщенность магнитной цепи трансформатора возрастет в весьма большой степени, а это поведет к сильному искажению кривой намагничивающего тока, т. е. к появлению в ней высших гармоник. Эти гармоники вызовут в цепи генератора и трансформатора колебания всевозможных частот, вплоть до наивысших, которые в значительной степени могут повысить амплитуду напряжения, т. е. вызвать перенапряжение на зажимах обмоток трансформатора. Кроме того вследствие высокой частоты могут возникнуть в обмотке местные колебания, влекущие за собою порчу изоляции между витками.

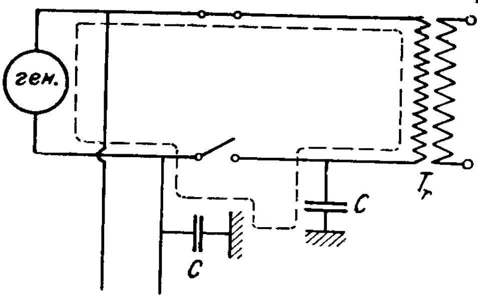


Рис. 199.

Перенапряжение у обмотки трансформатора появляется также при выключении длинной линии или кабеля без нагрузки. Оно является следствием вторичного включения линии, происходящего через повторно появляющуюся вольтову дугу между разошедшимися уже контактами выключателя. Это вторичное зажигание дуги объясняется следующим образом. При выключении линии в момент прохождения тока через нуль, — а в этот именно момент и выключают обычно масляные выключатели, — напряжение как раз проходит через амплитуду его (ибо нагрузка длинной линии — почти емкостная); это напряжение и останется на отключенных концах линии в качестве зарядного напряжения. Напряжение же обмотки трансформатора будет продолжать меняться по синусоиде. Через полпериода между контактами выключателя со стороны трансформатора и контактами выключателя со стороны линии будет действовать двойное нормальное напряжение, которое может вызвать вольтову дугу и как бы вторичное включение линии, но уже при двойном напряжении. Это включение линии даст бегущие в противоположные стороны волны с фронтом двойной, по сравнению с нормальным включением, высоты, а следовательно, и опасные перенапряжения как для линии, так и для трансформатора. При плохом устройстве контактов или при медленном выключении повторное загорание дуги может иметь место несколько раз.

Несовершенство выключателя, а именно неодновременное включение всех фаз, порча одного из контактов его или обрыв одной

или двух фаз линии—также могут дать перенапряжение у трансформатора, находящегося на конце линии. В самом деле, если одна линия будет разомкнута, то из самоиндукции трансформатора, емкости этой разомкнутой линии и последовательно с нею соединенной емкости остальной части линии (рис. 199) образуется цепь, в которой могут возникнуть свободные колебания той же частоты, что и частота питающего тока. Результатом этого в цепи появится резонанс напряжений, а следовательно, и перенапряжение обмотки трансформатора, доходящее до большой величины.

§ 97. Явления при внезапном коротком замыкании трансформатора.

Под внезапным коротким замыканием трансформатора подразумевается быстрое замыкание вторичной обмотки накоротко при при условии, что первичная обмотка находится под нормальным напряжением. Всякое внезапное короткое замыкание через некоторый весьма короткий промежуток времени переходит в установившееся короткое замыкание, при котором ток остается постоянным и равным $\frac{V_1}{z_k}$, где V_1 — первичное напряжение, а z_k — полное сопротивление обмоток трансформатора. В переходный период ток трансформатора может быть значительно больше тока установившегося короткого замыкания. Начальная сила тока внезапного короткого замыкания зависит от момента короткого замыкания. Предположим, что короткое замыкание происходит в момент перехода электродвижущей силы обмотки через наибольшее значение, когда главный магнитный поток трансформатора проходит через нулевое значение. В таком случае ток в обмотках получает сразу же то значение, которое он имеет при длительном коротком замыкании и при нормальном первичном напряжении. Картина изменения потоков трансформатора для данного случая короткого замыкания изображена на рис. 200. На рисунке кривая *1* дает изменение электродвижущей силы первичной обмотки E, кривая *2* дает изменение главного потока Ф при нормальной работе трансформатора, кривая *3* дает изменение потока в сердечнике $Ф_k$ при длительном коротком замыкании, и кривая *4* дает изменение потока рассеяния $Ф_{s2}$ вторичной обмотки.

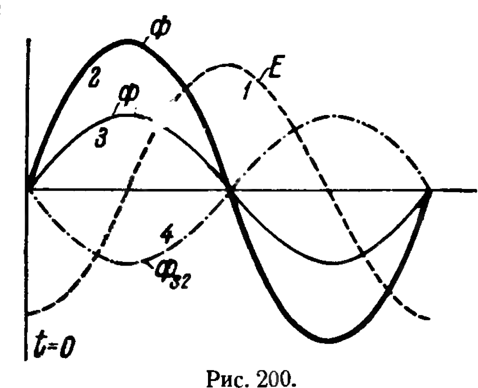


Рис. 200.

Рассматривая явления длительного короткого замыкания при условии, что активные сопротивления обмотки равны нулю, мы видели: 1) что поток в сердечнике $Ф_k$ при длительном коротком замыкании можно считать равным потоку рассеяния вторичной обмотки $Ф_{s2}$, 2) что по фазе эти потоки взаимно противоположны,

3) что можно считать поток рассеяния вторичной обмотки Φ_{s2}, а следовательно, и поток в сердечнике при коротком замыкании Φ_k равными главному потоку при нормальной работе, т. е. потоку, соответствующему нормальному напряжению V_1.

В рассматриваемом случае в момент короткого замыкания главный поток Φ проходит через нуль. Начиная с этого момента, поток в сердечнике начинает нарастать, но по кривой *3*, имеющей вдвое меньшую амплитуду, чем кривая *2* главного потока, ибо одновременно с потоком в сердечнике Φ_k будет нарастать и поток рассеяния вторичной обмотки Φ_{s2} по кривой *4*. Сумма значений потоков Φ_k и Φ_{s2} равна главному потоку Φ, проходящему через сердечник при нормальной работе. Но та же сумма, взятая с учетом направлений потоков для вторичной обмотки, даст нуль (см. рис. 200). Это значит, что вторичная короткозамкнутая обмотка будет стремиться сохранить свое магнитное состояние, бывшее в момент короткого замыкания, когда ни одна силовая линия ее не пронизывала.

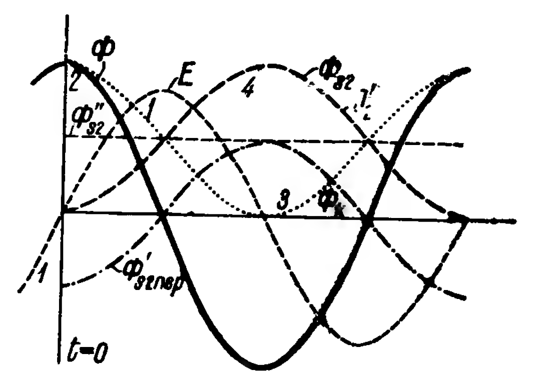


Рис. 201a.

Так как поток рассеяния вторичной обмотки совпадает по фазе с током в ней и ему пропорционален, то кривая *4* в другом масштабе может иллюстрировать изменение вторичного тока при коротком замыкании. Так как, далее, первичный ток в рассматриваемом случае короткого замыкания (когда потерь в трансформаторе нет) равен вторичному, но прямо противоположен ему, то кривая *3* может иллюстрировать изменение первичного тока.

Предположим теперь, что короткое замыкание трансформатора произошло в момент прохождения электродвижущей силы через нулевое значение или главного магнитного потока через наибольшее значение. В этом случае изменение магнитных потоков трансформатора представится рис. 201. На этом рисунке кривая *1* дает изменение электродвижущей силы E, кривая *2* — изменение главного потока Φ, кривая *3* — изменение потока в сердечнике Φ_k при коротком замыкании, кривая *4* — изменение потока рассеяния Φ_{s2} вторичной обмотки. Так как в первый момент короткого замыкания вторичную обмотку пронизывал поток, равный Φ, то согласно закону Ленца вторичная обмотка будет неизменно стремиться сохранить этот поток и в последующие моменты времени. Но сам поток Φ с течением времени уменьшается до значения его при установившемся коротком замыкании Φ_k; уменьшение главного потока восполняется полем рассеяния вторичной обмотки Φ_{s2}. Следовательно, начиная с момента короткого замыкания, возрастает поток рассеяния вторичной обмотки. Наибольшее значение поток рассеяния вторичной обмотки получит в момент, когда поток в сердечнике, т. е. поток короткого замыкания Φ_k, будет равен нулю и вторичная обмотка одна должна поддержать свое поле. Этот момент наступит спустя лишь полупериод. В самом деле, в любой момент времени сумма потоков Φ_{s2} и Φ_k, связанных с вторичною обмоткою, должна быть равна главному потоку Φ, имевшемуся в момент короткого замыкания, т. е.

$$\Phi_{s2} + \Phi_k = \Phi.$$

В этом равенстве поток рассеяния Φ_{s2} нарастает, а поток короткого замыкания Φ_k убывает с тою же скоростью, что и поток Φ_{s2}.

Через $\frac{1}{4}$ периода, когда $\Phi = 0$, поток рассеяния $\Phi_{s2} = -\Phi_k$.

Спустя еще $\frac{1}{4}$ периода, т. е. через полупериод после короткого замыкания, когда Φ проходит через наибольшее отрицательное значение, поток рассеяния $\Phi_{s2} = \Phi$, а поток в сердечнике $\Phi_k = 0$.

Таким образом поток рассеяния вторичной обмотки в рассматриваемом случае получает наибольшее значение через полупериод после момента короткого замыкания. Так как вторичный ток совпадает по фазе с током рассеяния вторичной обмотки, то и наибольший толчок вторичного тока, а следовательно, и первичного тока будет иметь место спустя полупериод после короткого замыкания. Из рис. 201a видно, что магнитный поток в сердечнике Φ_k, меняясь по синусоидальной кривой *3*, не меняет своего знака; он пульсирует между наибольшим значением и нулем, но не между наибольшим положительным и наименьшим отрицательным значениями. Из того же рисунка видно, что и вторичный поток рассеяния, меняясь по кривой *4*, пульсирует между наибольшим значением и нулем, будучи по фазе прямо противоположен потоку в сердечнике Φ_k. Кривую *4*, иллюстрирующую изменение вторичного тока, мы можем разложить на две кривые *5* и *6* (рис. 201b) и рассматривать действительный ток как бы равнодействующим двух токов: постоянного по величине и направлению (кривая *6*) и переменного по величине и направлению (кривая *5*). Переменный ток (кривая *5*) является током установившегося короткого замыкания, соответствующим потоку вторичного рассеяния при установившемся коротком замыкании. Так как поток вторичного рассеяния при рассматриваемом коротком замыкании вдвое больше потока рассеяния при установившемся коротком замыкании, то можно сказать, что

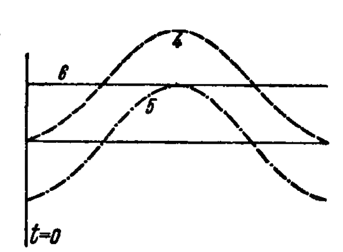


Рис. 201b.

теоретический ток короткого замыкания, происшедшего в момент прохождения главного потока через наибольшее значение, вдвое больше тока короткого замыкания, происшедшего в момент прохождения главного потока через нуль.

В действительности ток короткого замыкания в рассматриваемом случае достигает значения, примерно в 1,75 раз большего тока короткого замыкания, происшедшего в момент прохождения главного потока через нуль.

Ток, постоянный по направлению (кривая *6*) в действительности не сохраняет своей величины, а постепенно убывает до нуля. Скорость убывания постоянного тока значительно большая, чем при включении трансформатора, так как коэфициент самоиндукции от поля рассеяния, действующего при коротком замыкании, значительно меньше коэфициента самоиндукции главного поля, действующего при включении первичной обмотки. Чем меньше рассеяние трансформатора, тем быстрее наступает установившийся режим, но тем сильнее ток установившегося короткого замыкания. При большом рассеянии и при коротком замыкании в самый неблагоприятный момент, когда главный поток проходит через наибольшее значение (напряжение проходит через нуль), бросок тока может достигнуть значения, превышающего в 10—15 раз нормальный ток.

§ 98. Механические усилия в трансформаторе при коротком замыкании.

Значительный ток внезапного короткого замыкания вызывает в обмотках трансформатора большие механические усилия, имеющие следствием часто полное их разрушение. Механические усилия возникают прежде всего в катушках под влиянием проходящего через них тока. В самом деле, при прохождении тока через какой-либо контур в нем появляются силы, стремящиеся придать ему такую форму, при которой энергия магнитного поля его была бы наибольшей. Так, при прохождении тока через прямоугольную катушку механические силы стремятся превратить эту катушку в кольцевую (рис. 202), ибо при этом магнитный поток, пронизывающий катушку, будет наибольшим. Это обстоятельство заставляет часто отдавать предпочтение стержневым трансформаторам с цилиндрическими катушками перед броневыми трансформаторами с их обычно прямоугольными катушками.

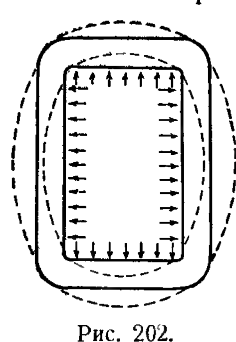


Рис. 202.

Механические усилия возникают кроме того как между катушками одной и той же обмотки, так и между катушками первичной и вторичной обмоток, ибо между проводами с токами всегда существует механическое взаимодействие: притяжение, если токи одного направления, и отталкивание, если токи прямо противоположного направления.

Сила этого взаимодействия пропорциональна произведению токов в проводниках. Чтобы выяснить характер действия катушек друг на друга, предположим, что имеются два концентрических контура, расположенных в одной плоскости (рис. 203*a*). При прохождении токов в них в одном направлении, как это имеет место в катушках одной и той же обмотки, между контурами возникает

притяжение, и всякий эксцентриситет в расположении контуров может повести к сдвигу их и даже соприкосновению друг с другом. При прохождении токов в противоположных направлениях, как это имеет место в катушках первичной и вторичной обмоток, между контурами возникают силы отталкивания, действующие радиально в плоскости контуров.

Предположим теперь, что контуры расположены друг над другом и обтекаются токами в противоположных направлениях (рис. 203b). В таком случае между контурами возникают силы отталкивания по оси катушек. Так как в трансформаторе направления токов в первичной и во вторичной обмотках почти прямо противоположны, то между этими обмотками всегда имеются отталкивающие силы; между катушками же одной и той же обмотки имеются силы притяжения.

Сила притяжения или отталкивания, действующая на обмотки трансформатора, определяется по общей формуле Био-Савара:

$$dF = \frac{idsB_x}{9{,}81} 10^{-6} \text{ кг},$$

где i — сила тока в элементе проводника длиною ds сантиметров, B_x — индукция в месте расположения элемента проводника ds.

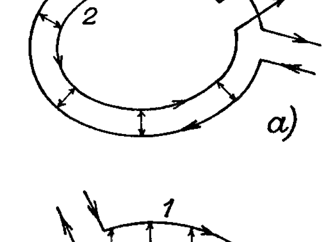


Рис. 203.

У трансформатора главный поток замыкается через сердечник, и потому сила F обусловливается исключительно потоком рассеяния. Распределение же потока рассеяния вокруг обмоток зависит от их конструкции. Разберем три случая.

Первый случай: трансформатор стержневой, обмотка цилиндрическая, причем на сердечнике имееются две катушки — первичная и вторичная. На рис. 204a изображено приблизительно распределение магнитных линий потока рассеяния с указанием их направления для момента, когда ток в катушке I идет от зрителя, а ток в катушке II — к зрителю. На рис. 204b изображено приблизительное распределение индукции потока рассеяния по линии AB. Наибольшее значение эта индукция имеет в промежутке между катушками, так как проходящие здесь силовые линии создаются током, идущим через все сечение катушки; эту индукцию приближенно можно определить по формуле:

$$B_\Delta = \frac{0{,}4\,\pi iw}{l} k,$$

где iw — число ампервитков катушки, а k — поправочный коэфициент, учитывающий неполную точность формулы и равный

$$1 - \frac{\Delta_1 + \Delta_2 \cdot 2\Delta}{2\pi l},$$

где Δ_1, Δ_2 и Δ см. на рис. 204.

*

С приближением к внутренней поверхности катушки I и внешней поверхности катушки II силовые магнитные линии создаются все меньшим и меньшим объемом тока катушки, а потому индукция потока рассеяния убывает.

Возьмем в сечении катушки полоску тока, находящуюся на расстоянии x от края промежутка между катушками, шириною dx и длиною, равной длине катушки l; по окружности катушки длина этой плоскости равна 1 *см*. Если через s обозначить плотность тока в меди катушки и через k_u — коэфициент заполнения катушки, учитывающий изоляцию, то сила тока, идущего в полоске, будет равна $s\ dx\ lk_u$. Предполагая, что индукция потока рассеяния по длине l неизменна, мы получаем для силы, действующей на 1 *см* длины (считая по окружности катушки) этой полоски, выражение:

Рис. 204.

$$f' = \frac{k_u s\, dx\, l B_x}{9{,}81} \cdot 10^{-6}\ кг.$$

В этом выражении B_x — индукция потока рассеяния в месте нахождения полоски с током. Принимая трапецоидальное распределение индукции потока рассеяния по линии AB (рис. 204), находим:

$$B_x = B_\Delta \frac{\Delta_1 - x}{\Delta_1} = \frac{1{,}25\, iwk}{l} \cdot \frac{\Delta_1 - x}{\Delta_1},$$

где Δ_1 — толщина катушки.

Сила, действующая на 1 *см* (считая по окружности) всей катушки, будет складываться из элементарных сил, подобных f', действующих на полоски шириною dx, т. е. определяются следующим выражением:

$$f = \int_0^{\Delta_1} k_u s\, dx\, l B_x \frac{10^{-6}}{9{,}81}\ кг.$$

Подставляя вместо B_x вышеприведенное значение и имея в виду, что $s \Delta_1\ lk_u = iw$, получаем:

$$f = 6{,}4\, k \frac{(iw)^2}{l} \cdot 10^{-8}\ кг.$$

Сила, действующая на всю катушку, имеющую среднюю окружность U, будет

$$F = 6{,}4\, k \frac{(iw)^2}{l} \cdot 10^{-8}\, U\ кг,$$

а сила, действующая на 1 *см*² ее поверхности, равной Ul, будет

$$F = 6{,}4\, k \left(\frac{iw}{l}\right)^2 \cdot 10^{-8}\ кг.$$

Сила F растягивает наружную катушку (см. рис. 203*а*) и сжимает внутреннюю, стремясь изменить форму обеих катушек. Так как индукция по длине катушек вопреки нашему предположению все же непостоянна и имеет большее значение у середины катушки, то сила F имеет большее значение также у середины катушки. Это нужно иметь в виду при конструировании длинных катушек.

Рис. 205.

Следует отметить, что при несимметричном расположении катушек (рис. 205) у силы F появляется составляющая, направленная по оси катушек; она тем больше, чем больше отличаются между собою длины катушек. Такой случай может быть у трансформаторов, имеющих на концах обмоток выводы для изменения коэфициента трансформации (рис. 206, левая схема). Во избежание разрушения обмоток при коротком замыкании трансформатора рекомендуется выводы брать от середины катушек (рис. 206, правая схема).

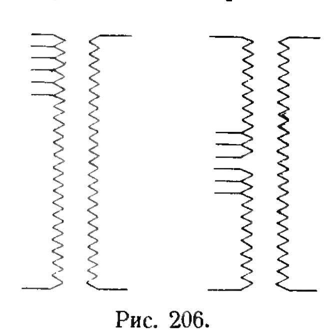


Рис. 206.

Второй случай: трансформатор стержневой, обмотка цилиндрическая, на сердечнике имеются одна катушка первичная и две катушки вторичные, из которых одна внутренняя, а другая — наружная.

Приблизительное распределение магнитных линий потока рассеяния изображено на рис. 207. Наибольшая индукция, имеющаяся в промежутке между катушками, равна

$$B_\Delta = \frac{1}{2} \cdot \frac{0{,}4\pi iw}{l} k.$$

Сила, действующая на полоску с током $k_u s\ dx\ l$ и длиною по окружности катушки в 1 *см*,

$$f' = \frac{k_u s\, dx\, l B_x}{9{,}81} \cdot 10^{-6}\ кг.$$

Сила, действующая на 1 *см* окружности катушки,

$$f = \int_0^{\frac{\Delta_2}{2}} k_u s\,dx\,lB_x \frac{10^{-6}}{9{,}81} кг = 1{,}6 \frac{(iw)^2}{l} k \cdot 10^{-8}\ кг,$$

на всю катушку действует сила

$$F = 1{,}6\,k \frac{(iw)^2}{l} \cdot 10^{-8}\,U\ кг,$$

где U — средняя окружность катушки.

Наконец, на 1 *см*² поверхности катушки действует сила

$$F' = 1{,}6\,k \left(\frac{iw}{l}\right)^2 \cdot 10^{-8}\ кг.$$

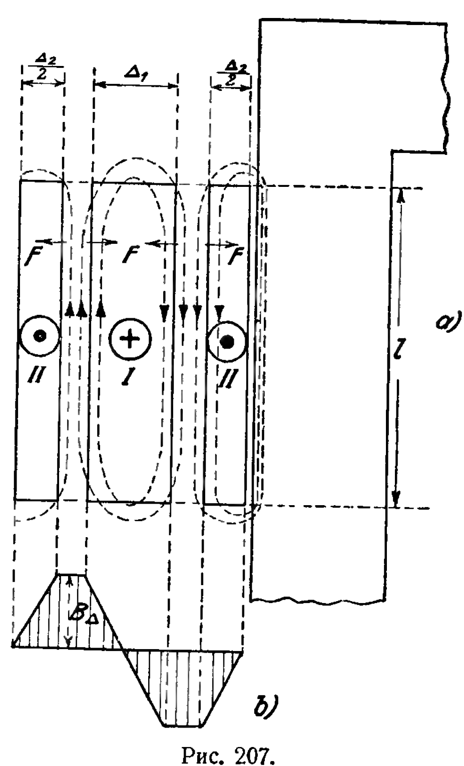


Рис. 207.

Таким образом сила, действующая на катушки при рассматриваемой конструкции их, в четыре раза меньше силы, которая имеет место при первой конструкции.

Третий случай: трансформатор стержневой, обмотка дисковая, катушки насажены на сердечник поочередно.

На рис. 208 изображено приблизительное распределение магнитных линий потока рассеяния. Наибольшая индукция, имеющаяся в промежутках между катушками,

$$B_\Delta = k \frac{0{,}4\,\pi i w_s}{2l},$$

где w_s — число витков одной катушки, а l — ширина катушки. Индукция в какой-либо точке, находящейся на расстоянии x от края катушки, будет

$$B_x = B_\Delta \frac{\frac{\Delta_1}{2} - x}{\frac{\Delta_1}{2}} = B_\Delta \frac{\Delta_1 - 2x}{\Delta_1}.$$

Сила, действующая на 1 *см* длины катушки, считая по окружности, будет

$$f = \int_0^{\frac{\Delta}{2}} \frac{10^{-6}}{9{,}81} k_u s\,lB_x\,dx = 1{,}6\,k \frac{(w_s i)^2}{l} \cdot 10^{-8}\ кг.$$

Сила, действующая на всю катушку,

$$F = 1{,}6\,k\,U \frac{(w_s i)^2}{l} \cdot 10^{-8}\ кг.$$

Сила, действующая на 1 *см*² поверхности катушки,

$$F' = 1{,}6\,k \left(\frac{w_s i}{l}\right)^2 \cdot 10^{-8}\ кг.$$

Сила F сжимает средние катушки и прижимает верхние катушки к ярму сердечника. Для того чтобы силы, сжимающие средние катушки, взаимно уничтожались и не давали равнодействующей, смещающей катушки вдоль сердечника и увеличивающей силу, прижимающую крайние катушки к ярму, необходимо соответствующим образом сгруппировать катушки обмоток высшего и низшего напряжения. Как обмотка высшего напряжения, так и обмотка низшего напряжения у мощных трансформаторов составляется из отдельных дисковых катушек. Пару катушек низшего и высшего напряжения *НВ* или высшего и низшего напряжения *ВН* можно рассматривать как элемент обмотки одного сердечника. Эти-то элементы и группируют так или иначе, причем следят за тем, чтобы ампервитки катушек были по возможности одинаковы. Группировку иногда определяют номером; например: группировка *НВВН* — симметричная группировка 2*ВН*, группировка *НВВННВВН* — симметричная группировка 4*ВН* и т. д. Так как с увеличением номера группировки уменьшается число витков катушки, то, как показывает последнее выражение для силы F, эта сила уменьшается с увеличением номера группировки и притом обратно пропорционально номеру группировки во второй степени. С точки зрения уменьшения силы F желательно было бы значительное деление обмоток. Но нетрудно было бы доказать, что в этом случае самоиндукция трансформатора от поля рассеяния получилась бы небольшой, а самоиндукция трансформатора ограничивает токи короткого замыкания и тем самым защищает трансформатор от разных вредных последствий. Таким образом в отношении повышения номера группировки не приходится итти слишком далеко.

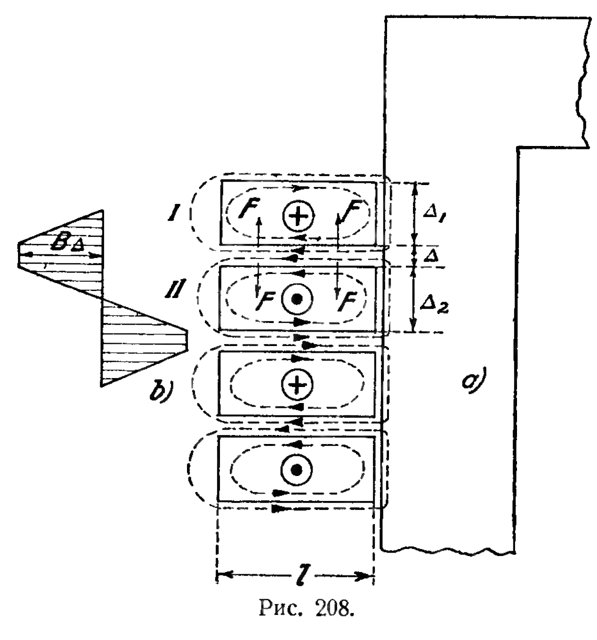


Рис. 208.

Уже было указано, что механические силы, действуюшие на крайние катушки, не будучи уравновешены, прижимают их к ярму. Так как у ярма индукция потока рассеяния довольно значительна, то и прижимающие силы могут быть значительны при коротком замыкании. Они тем больше, чем более насыщено железо. Наличием этих сил и объясняется деформация (а иногда и разрушение) концевых катушек и при внезапных коротких замыканиях или при включениии первичной обмотки.

Средством уменьшения механических сил в трансформаторе является увеличение его индуктивного сопротивления от потока рассеяния. У трансформатора с дисковой обмоткой этого можно достигнуть, во-первых, путем уменьшения числа катушек или групп катушек, следовательно, путем увеличения ширины катушки; во-вторых, — путем увеличения рассеяния между катушками низшего и высшего напряжений; в-третьих, — путем введения листов железа в изоляцию между катушками низшего и высшего напряжения. У трансформатора с концентрическими катушками индуктивное сопротивление повышается путем увеличения расстояния между катушками первичной и вторичной обмоток. Следует заметить, что индуктивное сопротивлением ($2\pi fL$) прямо пропорционально частоте, и потому ток короткого замыкания, а следовательно, и механические усилия, относительно больше у трансформаторов низкой частоты, нежели у трансформаторов высокой частоты.

Средством борьбы с деформациями катушек трансформатора является солидная конструкция самих катушек и солидное укрепление их на сердечниках как в радиальном, так и в осевом направлениях. У трансформаторов с цилиндрическими катушками радиальное крепление осуществляется с помощью изоляционных гильз, располагаемых между катушками высшего и низшего напряжения, и дистанционных радиальных прокладок, размещаемых в разных местах по высоте катушек между гильзами и корпусом. Гильзы, обладающие относительно большою мехеническою прочностью, и распорки дают в общем надежную опору для катушек. Осевое крепление катушек достигается крепкими прокладками из изоляции между катушками и ярмом. У трансформаторов с дисковыми катушками осевое крепление достигается радиальными прокладками между отдельными катушками и сильными конечными опорными дисками из изоляции. Само собою разумеется, все эти крепления устраиваются так, чтобы они не мешали прохождению охлаждающего масла, если речь идет о масляных трянсформаторах.

§ 99. Контрольные вопросы.

1. Активное сопротивление обмотки высшего напряжения AX (см. рис. 160) автотрансформатора мощностью 25 kVA при напряжении $V_1 : V_2 = 550 : 100$ V равно 0,0682 Ω, а активное сопротивление обмотки низшего напряжения aX равно 0,0042 Ω. Реактивное сопротивление части обмотки Aa равно 0,214 Ω, а обмотки низшего напряжения aX равно 0,0132 Ω. Какое напряжение нужно подвести в обмотке низшего напряжения aX для того, чтобы в обмотках проходили нормальные токи полной нагрузки, если часть обмотки Aa будет замкнута накоротко? Какую мощность нужно подвести при этом к автотрансформатору? Какова диаграмма автотрансформатора при нормальной активной нагрузке?

2. Два трансформатора мощностью 500 kVA с трансформацией $V_1 : V_2 = 11000 : 2300$ V имеют следующие данные опыта короткого замыкания:

	I_{1k}	V_{1k}	P_{1k}
а) стержневой	45,5	345	3375
в) броневой	45,5	345	4680

Трансформаторы соединены параллельно со стороны высшего и низшего напряжения и доставляют вместе ток 452 A при коэфициенте мощности $\cos\varphi_2 = 0,95$. Каковы токи, доставляемые каждым трансформатором?

3. Начертить диаграммы трансформатора согласно пп. 1 и 2 § 65.

ИЗВЛЕЧЕНИЯ ИЗ ОБЩЕСОЮЗНОГО СТАНДАРТА ОСТ 4815.

Мощности и номинальные напряжения понижающих однофазных двухобмоточных трансформаторов.

Номинальная мощность трансформатора kVA	Номинальные напряжения обмоток высшего напряжения kV					Номинальные напряжения обмоток низшего напряжения kV				
5 000	10,5	15	35	110	—	3,3	6,6	11	38,5	—
6 667	—	—	35	110	—	—	6,6	11	38,5	—
10 500	—	—	35	110	220	—	6,6	11	38,5	—
13 500	—	—	—	110	220	—	6,6	11	38,5	121
20 000	—	—	—	110	220	—	—	11	38,5	121
37 500	—	—	—	110	220	—	—	11	38,5	121

Примечание. Номинальные напряжения обмоток высшего напряжения представляют собой междуфазовые напряжения тех трехфазных сетей, в которых работают однофазные трансформаторы при соединении обмоток высшего напряжения звездой.

Мощности и номинальные напряжения повышающих однофазных двухобмоточных трансформаторов.

Номинальная мощность трансформатора kVA	Номинальные напряжения обмоток низшего напряжения kV			Номинальные напряжения обмоток высшего напряжения kV		
5 000	6,3	10,5	—	38,5	121	—
6 667	6,3	10,5	—	38,5	121	—
10 500	6,3	10,5	—	38,5	121	242
13 500	6,3	10,5	—	38,5	121	242
20 000	—	10,5	—	38,5	121	242
37 500	—	—	15	38,5	121	242

Примечание. Номинальные напряжения обмоток высшего напряжения представляют собой междуфазовые напряжения тех трехфазных сетей, в которых работают однофазные трансформаторы при соединении обмоток высшего напряжения звездой.

Мощности и номинальные напряжения повышающих трехфазных двухобмоточных трансформаторов.

Номинальная мощность трансформатора kVA	Номинальные напряжения обмоток низшего напряжения kV		Номинальные напряжения обмоток высшего напряжения kV		
3 200	6,3	10,5	38,5	—	—
5 600	6,3	10,5	38,5	—	—
7 500	6,3	10,5	38,5	121	—
10 000	6,3	10,5	38,5	121	—
15 000	6,3	10,5	38,5	121	242
20 000	6,3	10,5	38,5	121	242
31 500	6,3	10,5	38,5	121	242

Мощности и номинальные напряжения понижающих трехфазных двухобмоточных трансформаторов.

Номинальная мощность трансформатора kVA	Номинальные напряжения обмоток высшего напряжения V									Номинальные напряжения обмоток низшего напряжения V											
5	3 000	6 000	—	10 000	—	—	—	—	—	133	230	400	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	3 000	6 000	—	10 000	—	—	—	—	—	133	230	400	—	—	—	—	—	—	—	—	—
20	3 000	6 000	—	10 000	—	—	35 000	—	—	133	230	400	—	—	—	—	—	—	—	—	—
50	3 000	6 000	—	10 000	—	—	35 000	—	—	133	230	400	—	—	—	—	—	—	—	—	—
100	3 000	6 000	—	10 000	—	—	35 000	—	—	133	230	400	—	—	—	—	—	—	—	—	—
180	3 000	6 000	—	10 000	—	—	35 000	—	—	133	230	400	525	3 150	—	—	—	—	—	—	—
320	3 000	6 000	—	10 000	—	—	35 000	—	—	133	230	400	525	3 150	—	6 300	—	—	—	—	—
560	3 000	6 000	—	10 000	—	—	35 000	—	—	133	230	400	525	3 150	—	6 300	—	—	—	—	—
1 000	3 000	6 000	—	10 000	—	—	35 000	—	—	—	230	400	525	3 150	—	6 300	—	10 500	—	—	—
1 800	3 000	6 000	—	10 000	—	—	35 000	—	—	—	—	400	525	3 150	—	6 300	—	10 500	—	—	—
3 200	—	6 000	—	10 000	—	—	35 000	110 00	—	—	—	—	—	3 150	3 300	6 300	6 600	10 500	11 000	38 500	—
5 600	—	6 000	—	10 000	—	—	35 000	110 000	—	—	—	—	—	3 150	3 300	6 300	6 600	10 500	11 000	38 500	—
7 500	—	—	6 300	—	10 500	15 000	35 000	110 000	—	—	—	—	—	—	3 300	—	6 600	—	11 000	38 500	—
10 000	—	—	6 300	—	10 500	15 000	35 000	110 000	—	—	—	—	—	—	3 300	—	6 600	—	11 000	38 500	—
15 000	—	—	—	—	10 500	15 000	35 000	110 000	220 000	—	—	—	—	—	3 300	—	6 600	—	11 000	38 500	—
20 000	—	—	—	—	—	—	35 000	110 000	220 000	—	—	—	—	—	—	—	6 600	—	11 000	38 500	—
31 000	—	—	—	—	—	—	35 000	110 000	220 000	—	—	—	—	—	—	—	6 600	—	11 000	38 500	121 200

Примечание 1. Для трансформаторов мощностью до 560 kVA коэфициент трансформации должен быть не ниже 3 : 1.

Примечание 2. Трансформаторы мощностью 3200 и 5600 kVA на номинальное напряжение обмотки высшего напряжения 110 000 V изготовляются только на следующие номинальные напряжения обмотки низшего напряжения: 3300; 6600; 11 000 и 38 500 V.

Потери холостого хода, потери в меди, коэфициент полезного действия, падение напряжения, напряжение короткого замыкания и ток холостого хода понижающих трехфазных двухобмоточных трансформаторов.

Мощность трансформатора kVA	Верхний предел стандартного напряжения		Потери холостого хода при номинальном напряжении W	Потери в меди при номинальной нагрузке W	Коэфициент полезного действия при $\cos\varphi = 1$		Падение напряж. при номин. нагрузке и $\cos\varphi = 1^0/_0$	Напряжение короткого замыкания в $^0/_0$ от номинального напряж.	Ток холостого хода в $^0/_0$ от номинального тока	Мощность трансформатора kVA
	ВН kV	НН V			при $^1/_1$ номинальной нагрузки	при $^1/_2$ номинальной нагрузки				
5	6	400	60	185	95,33	95,92	3,8	5,5	10	5
	20	400	90	185	94,8	94,9	3,8	5,5	10	
10	6	400	105	335	95,79	96,36	3,45	5,5	10	10
	20	400	140	335	95,47	95,71	3,45	5,5	10	
20	6	400	180	600	96,25	96,81	3,10	5,5	10	20
	20	400	220	600	96,06	96,43	3,10	5,5	10	
	35	400	270	600	95,83	95,97	3,15	6,5	10	
50	6	400	355	1 325	96,75	97,32	2,75	5,5	8,5	50
	20	400	440	1 325	96,59	97,01	2,75	5,5	9	
	35	400	540	1 325	96,40	96,64	2,85	6,5	9,5	
100	6	400	600	2 400	97,09	97,66	2,50	5,5	7	100
	20	400	730	2 400	96,96	97,41	2,50	5,5	7,5	
	35	400	900	2 400	96,81	97,09	2,60	6,5	8	
180	6	525	1 000	4 000	97,3	97,83	2,35	5,5	7	180
	20	525	1 200	4 100	97,18	97,59	2,35	5,5	7,5	
	35	3 150	1 500	4 100	96,97	97,27	2,45	6,5	8	
320	6	525	1 600	6 070	97,66	98,09	2,05	5,5	7	320
	20	525	1 900	6 200	97,54	97,89	2,05	5,5	7,5	
	35	6 300	2 300	6 200	97,41	97,65	2,15	6,5	8	
560	6	525	2 500	8 960	97,99	98,33	1,75	5,5	7	560
	20	525	2 800	9 400	97,87	98,19	1,80	5,5	7,5	
	35	6 300	3 350	9 400	97,77	98,0	1,85	6,5	8	
1 000	20	6 300	4 700	15 000	98,07	98,34	1,65	5,5	6	1 000
	35	10 500	5 100	15 000	98,03	98,26	1,70	6,5	6,5	
1 800	20	6 300	8 850	23 000	98,26	98,40	1,45	5,5	5	1 800
	35	10 500	9 300	23 000	98,23	98,37	1,50	6,5	5,5	
3 200	20	6 300	12 000	36 500	98,5	98,7	1,30	5,5	5	3 200
	35	10 500	12 500	36 500	98,49	98,67	1,35	7	5,5	
5 600	20	6 300	19 500	54 500	98,7	98,83	1,15	5,5	5	5 600
	35	10 500	21 000	54 500	98,67	98,78	1,20	7,5	5,5	

П р и м е ч а н и е 1. Для значений потерь холостого хода, потерь в меди, падения и напряжения короткого замыкания устанавливается допуск $+10^0/_0$.

П р и м е ч а н и е 2. Для значения тока холостого хода устанавливается допуск $\pm 20^0/_0$.

П р и м е ч а н и е 3. Ток холостого хода определяется как среднее значение токов отдельных фаз, измеренных при опыте холостого хода, в процентах от номинального тока.

Примечание 4. Коэфициент полезного действия определяется по формуле:

$$\eta_1 = 1 - \frac{P_0 + P_k}{P\cos\varphi_2 + P_0 + P_k}\,100,$$

где η — коэфициент полезного действия в процентах;
P_0 — потери холостого хода в киловаттах;
P_k — потери в меди в киловаттах, определяемые при опыте короткого замыкания;
P — номинальная мощность в киловольтамперах;
$\cos\varphi_2$ — коэфициент мощности вторичвой цепи.

П р и м е ч а н и е 5. Допуск для коэфициента полезного действия определяется соотношением

$$\frac{100 - \eta}{10}\,^0/_0.$$

П р и м е ч а н и е 6. Падение напряжения определяется по формуле:

$$\varepsilon^0/_0 = e_r\cos\varphi_2 + e_s\sin\varphi_2 + \frac{1}{200}\,(e_s\cos\varphi_2 - e_r\sin\varphi_2)^2,$$

где

$$e_r = \frac{P_k}{P}\,100;$$

$$e_s = \sqrt{e_k^2 - e_r^2},$$

а e_k — напряжение короткого замыкания, отнесенное к номинальной частоте тока и к температуре 75° и определяемое опытом короткого замыкания.

ПРАВИЛА И НОРМЫ ИСПЫТАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ.[1]

I. Применимость настоящих норм.

§ 1.

Данные нормы относятся ко всем трансформаторам, за исключением:

1) трансформаторов, предназначенных для установки на подвижном составе электрических железных дорог;
2) трансформаторов для электрических печей;
3) испытательных трансформаторов;
4) измерительных трансформаторов и трансформаторов для питания линий слабого тока;
5) индукционных потенциал-регуляторов.

II. Общие замечания.

§ 2.

1. Нижеприводимые правила и нормы касаются трансформаторов, предназначенных для установки в местностях, которые расположены не выше 1000 *м* над уровнем моря, и в помещениях, где температура окружающей среды не превышает 35° С. В противном случае условия испытания оговариваются особо.

2. Испытания трансформаторов, согласно настоящим нормам, производятся над новыми трансформаторами по возможности на месте их изготовления. Испытания на месте установки оговариваются особо техническими условиями заказа.

[1] Одобрены IX Всесоюзным электротехническим съездом. Перепечатаны из сборника „Электротехнические правила и нормы", изд. 1931 г.

3. Форма кривой приложенного к трансформатору напряжения предполагается практически синусоидальной.

Кривая напряжения считается практически синусоидальной, если ни одна из ее ординат a не отличается от соответствующей ординаты b основной синусоиды более, чем на 5% амплитудной ординаты основной синусоиды (см. рис. 1).

Примечание. Для определения основной волны должны быть использованы по меньшей мере 12 точек кривой напряжения. Для кривых, которые во все четверти периода симметричны, амплитуда основной волны вычисляется по формуле:

$$S = \frac{a_0 + \sqrt{3}.\, a_1 + a_2}{3},$$

где a_0 — наибольшее мгновенное значение ординаты действительной кривой, а a_1 и a_2 — мгновенные значения соседних точек той же кривой, отстоящих от a_0 на $^1/_{12}$ и $^2/_{12}$ периода.

Рис. 1.

4. Многофазная система подводимого напряжения предполагается практически симметричной.

Многофазные системы напряжения считаются практически симметричными, если отношение суммы квадратов разности между амплитудными значениями напряжения каждой фазы и средним значением тех же величин во всех фазах к квадрату среднего значения этих же величин равно или менее 0,004, т. е.

$$\frac{\Sigma \Delta E^2}{E_{cp}^2} \leqq 0{,}004,$$

где

$$E_{cp} = \frac{E_1 + E_2 + \ldots + E_n}{n};$$

$$\Delta E_1 = E_1 - E_{cp}; \quad \Delta E_2 = E_2 - E_{cp} \text{ и т. д.}$$

5. Если обмотки трансформатора имеют ответвления, то при испытании трансформатор должен быть включен на ответвления, соответствующие номинальным условиям работы (см. § 7).

III. Основные определения.

§ 3.

1. Трансформатором называется статический электромагнитный аппарат, в котором электрическая энергия преобразовывается в электрическую же без посредства движения его частей.

2. Первичной обмоткой трансформатора называется та, к которой электрическая энергия подводится.

3. Вторичной обмоткой трансформатора называется та, от которой электрическая энергия отводится.

4. Обмотка высшего напряжения — обмотка, присоединяемая к сети более высокого напряжения.

5. Обмотка низшего напряжения — обмотка, соединяемая с сетью более низкого напряжения.

Определения, указанные в пп. 4 и 5, следует понимать независимо от числа витков в каждой из обмоток.

6. Трансформатором с ответвлениями называется трансформатор, обмотки которого имеют специальные ответвления для изменения соотношения между числами витков первичной и вторичной обмоток. Зажимы ответвлений, соответствующие нормальному включению трансформатора для номинальных условий работы (см. § 7), помечаются согласно § 31 настоящих „Норм".

7. Номинальные напряжения, токи, мощность, частота и режим работы суть те, которые указаны на щитке трансформаторов.

При наличии ответвлений на обмотках только одно из указанных на щитке напряжений, особо обозначенное, считается номинальным.

8. Первичное номинальное напряжение трансформатора есть то напряжение, которое должно подводиться к первичной обмотке трансформатора.

9. Вторичное номинальное напряжение есть то, которое должно устанавливаться на зажимах вторичной обмотки при холостом ходе и номинальном напряжении.

10. Коэфициентом трансформации трансформатора, если не имеется оговорок в ином смысле, называется отношение номинальных напряжеиий.

11. Номинальные силы тока трансформатора определяются из номинальных значений мощности и напряжений.

12. Номинальная мощность трансформатора выражается в киловольтамперах или вольтамперах.

Примечание. Отдаваемая трансформатором мощность при номинальной силе тока меньше номинальной мощности на величину, соответствующую процентному падению напряжения при заданном коэфициенте мощности.

IV. Классификация аппаратов трансформаторного типа.

А. Классификация по конструкции.

§ 4.

1. Трансформатором называется аппарат с отдельными, электрически несоединенными, первичной или вторичной системами обмоток.

2. Автотрансформатором называется аппарат, в котором часть обмотки принадлежит одновременно первичной и вторичной системам.

3. Потенциал-регулятором (трансформатором-регулятором напряжения) называется аппарат, служащий для изменения напряжения в цепи переменного тока.

Такие трансформаторы бывают:

а) индукционные — с изменением взаимного расположения обмоток (§ 1);

б) контактные — с изменением числа витков одной из систем.

4. Реактивными катушками называются индуктивные аппараты с одной системой обмоток, служащие для защиты или регулирования электрических цепей.

Б. Классификация по способу охлаждения.

§ 5.

Аппараты трансформаторного типа, перечисленные в пункте „А" настоящего параграфа, бывают:

1) сухие с естественным охлаждением;
2) сухие с исскуственным воздушным охлаждением;
3) масляные с естественным охлаждением;
4) масляные с искусственным воздушным охлаждением масляного бака;
5) масляные с внутренним водяиым охлаждением масла;
6) масляные с искусственной циркуляцией масла и охлаждеиием его в особых охладителях; эти охладители могут быть:

а) с сстественным воздушным охлаждением.

б) с искусственным воздушным охлаждением;

в) с водяным охлаждением.

V. Режимы работы трансформаторов, предельные нормы нагрева и испытаиие на нагревание.

§ 6.

1. Различаются следующие режимы работы трансформаторов: а) продолжительная нагрузка; б) кратковременная нагрузка; в) повторно-кратковременная нагрузка.

2. Продолжительной нагрузкой считается такая, период которой настолько велик, что нагрев трансформатора достигает своего установившегося состояния.

3. Кратковременной нагрузкой считается такая, при которой нагрев трансформатора за время работы не успевает достичь установившегося состояния.

Перерыв в работе трансформатора, предназначенного для кратковременной нагрузки, должен быть достаточно велик для того, чтобы при возобновлении работы температура трансформатора не отличалась: а) от температуры охлаждающей среды, если трансформатор во время перерыва в работе совершенно отключается от сети; б) от установившейся температуры холостого хода, если трансформатор во время перерыва в работе не отключается от сети.

Мощность трансформаторов, предназначенных для кратковременной работы, должна указываться на щитке трансформатора с дополнительной надписью: „в течение ... часов".

4. Повторно-кратковременной нагрузкой называется такая, при которой рабочие периоды регулярно чередуются с периодами выключения или работы вхолостую, причем за время выключения или работы вхолостую температура трансформатора не успевает понизиться до температуры охлаждающей среды (в случае выключения) или до установившейся температуры холостого хода (в случае работы вхолостую). Продолжительность рабочего периода не должна превышать 5 мин. Отношение рабочего периода полного цикла не должно превосходить 50%.

Мощность трансформаторов, предназначенных для повторно-кратковременной работы, должна указываться на щитке трансформатора с дополнительной надписью: „при повторно-кратковременной работе".

Примечание. При заказе трансформатора должно быть оговорено, должен ли трасформатор во время перерывов совсем выключаться или работать вхолостую.

§ 7.

1. При продолжительной нагрузке трансформатор должен работать в номинальных условиях (указанных на щитке) любое время, причем повышение температуры частей трансформатора не должно превосходить устанавливаемых в § 12 пределов.

2. При кратковременной нагрузке трансформатор должен работать в номинальных условиях (указанных на щитке) в течение поставленного на щитке времени, причем повышение температуры частей трансформатора не должно превосходить устанавливаемых в § 12 пределов.

3. При повторно-кратковременной нагрузке трансформатор должен работать в номинальных условиях (указанных на щитке) с соблюдением заданных промежутков любое время, причем повышение температуры частей трансформатора не должно превосходить устанавливаемых в § 12 пределов.

§ 8.

1. Все изолирующие материалы, применяемые в трансформаторах, разделяются на следующие четыре класса:

Класс „О": непропитанные и непогруженные в масло волокнистые материалы, как то: хлопчатобумажная пряжа и ткань, натуральный шелк, бумага и тому подобные органические вещества.

Класс „А": пропитанные или погруженные в масло волокнистые материалы, как то: хлопчатобумажная пряжа и ткань, натуральный шелк, бумага и тому подобные органические вещества; к этому же классу относится также эмаль, служащая для покрытия проводников.

Класс „В": препараты из слюды, асбеста и тому подобных материалов минерального происхождения со связующими веществами.

Если совместно с изоляционным материалом класса „В" с целью крепления применяется в небольшом количестве изоляционный материал класса „А", то подобная комбинированная изоляция может быть отнесена к классу „В" в том случае, если электрические и механические свойства обмотки с этой изоляцией не ухудшаются из-за действия более высокой температуры, допускаемой для материалов класса „В". (Здесь под словом „ухудшение" следует понимать, что не будут иметь места никакие изменения, которые могут сделать изоляцию непригодной для длительной работы.)

Класс „С": слюда без связущих материалов, фарфор, стекло, кварц и другие подобные материалы.

Примечание. Хлопчатобумажная, бумажная и шелковая изоляция считаются „пропитанными", если пропитывающее вещество вытесняет собой воздух между отдельными волокнами, причем это вещество не должно обязательно заполнять собой промежуток между изолированными проводниками. Пропитывающее вещество должно обладать хорошими изолирующими свойствами, должно в совершенстве обволакивать волокна, способствовать плотному взаимному сцеплению волокон как между собой, так и с телом проводника; это вещество не должно образовывать пустых пространств внутри изоляции проводника как вследствие своего испарения, так и по каким-либо другим причинам. Оно не должно разжижаться под влиянием допустимых предельных температур. Наконец, оно должно быть теплостойким (§ 4 „Правил безопастности IX ВЭС").

2. Если применяется комбинированная изоляция из материалов, принадлежащих к различным классам, за исключением случаев, относящихся к классу „В" и указанных в п. 1, то превышение температуры изоляции не должно превосходить предельного значения, допускаемого для каждого из применяемых материалов.

Примечание 1. Если для различных частей одной и той же обмотки применены два или несколько изолирующих материалов различной теплостойкости, то для превышения температуры, определяемого по сопротивлению всей обмотки, можно допустить предел, соответствующий наиболее теплостойкой изоляции, только в том случае, когда измерения температуры в местах с менее теплостойкой изоляцией не покажут нагрева, превышающего установленные для нее пределы. В противном случае допускаемый предел превышения температуры выбирается по наименее теплостойкому материалу.

Примечание 2. Если изоляция, примененная для какой-либо части, состоит из чередующихся слоев изолирующих материалов разных классов (например чередующихся слоев материалов класса „А" и класса „В"), то предельной допустимой для такой части температурой является та, которая соответствует материалу с наименьшей предельной температурой.

§ 9.

Измерение отдельных частей трансформатора и окружающей среды производится:

а) по методу термометра или

б) по методу сопротивления.

Для измерения температуры поверхностей и окружающей среды по методу термометра применяются ртутные, спиртовые и другие термометры.

Спиртовой термометр рекомендуется применять во всех тех случаях, где возможно появление в ртути токов Фуко.

Метод термометра применяется для измерения температуры охлаждающей среды, железного сердечника и масла; метод же сопротивления — для определения температуры обмоток.

Примечание. Измерение температуры масла, наружных нагретых поверхностей, железного сердечника и обмоток весьма малого сопротивления можно производить при помощи метода сопротивления или термоэлементов, но в сомнительных случаях результаты измерений проверяются по термометру, показания которого принимаются за окончательные.

§ 10.

Наивысшая температура охлаждающей среды устанавливается в 35° С для воздуха и в 25° для воды.

Примечание 1. Действительные температуры охлаждающей среды могут быть при испытании меньше, чем наивысшая, так как опыт показывает, что это обстоятельство не влияет заметным образом на величину превышения температуры, вследствие чего нет необходимости в корректировании результатов испытания. Желательно, однако, чтобы температура охлаждающей среды при испытании была не ниже 10° С.

Примечание 2. Испытание трансформатора с водяным охлаждением должно производиться при пропуске количества воды, указанного на щитке, независимо от температуры воды.

§ 11.

Превышение температуры данной части трансформатора, предназначенного для продолжительной и повторно-кратковременной нагрузки, определяется как разность температур между наибольшей наблюдаемой температурой данной части и температурой охлаждающей среды; в трансформаторах, предназначенных для кратковременной нагрузки, превышение температуры определяется как разность между температурами данной части в начале и конце испытания,

§ 12.

Наибольшие наблюдаемые температуры и наибольшие превышения температуры отдельных частей трансформатора не должны превосходить значений, указанных в таблице на стр. 243.

§ 13.

Испытание на нагревание производится во всех случаях при условиях, указанных на щитке, с соблюдением следующих правил:

1) При продолжительной нагрузке испытание на нагревание может быть начато как с холодного, так и с нагретого состояния трансформатора и продолжается до тех пор, пока не прекратится дальнейшее повышение температуры.

Примечание. Испытание на нагревание может быть прервано и раньше при условиях, указанных в § 18.

2. При кратковременной нагрузке, если траансформатор не отключается от сети на время, когда он не работает, испытание на нагревание начинается при установившейся температуре, соответствующей холостому ходу, и прекращается по прошествии промежутка времени, указанного на щитке.

Если трансформатор, предназначенный для кратковременной нагрузки, отключается от сети на время, когда он не работает, то испытание на нагревание начинается в холодном состоянии, когда температура обмотки превышает температуру охлаждающей среды не больше, чем на 3° С, и прекращается по прошествии промежутка времени, указанного на щитке.

3. При повторно-кратковременной нагрузке испытание на нагревание может начинаться как с холодного, так и с нагретого состояния трансформатора. Испытание производится с соблюдением заданных промежутков времени до тех пор, пока не прекратится дальнейшее повышение температуры.

При отсутствии особых оговорок время одного полного периода, состоящего из времени работы и времени, когда трансформатор не работает, должно быть равно 10 минутам.

§ 14.

За температуру охлаждающей среды принимают:

1. В сухих и масляных трансформаторах с естественным охлаждением среднюю арифметическую из температур окружающего воздуха, измеренных через равные промежутки в течение последней четверти периода испытания.

Измерение температуры окружающего воздуха производится при помощи двух или нескольких термометров, которые располагаются на расстоянии в 1—2 *м* от трансформатора приблизительно на уровне середины его высоты. Термометры должны быть защищены от потоков нагретого и холодного воздуха и от теплового излучения трансформатора.

Примечание. Во избежание ошибок, могущих получиться из-за резких колебаний температуры охлаждающей среды, при испытании масляных трансформаторов большой мощности температуру охлаждающей среды надлежит измерять по термометру, помещенному в металлический сосуд с маслом. Размеры сосуда должны быть таковы, чтобы они предохраняли термометр от влияния резкого колебания температуры окружающей среды (не менее 25 *мм* в диаметре и 50 *мм* по высоте).

2. В трансформаторах с искусственным воздушным охлаждением за температуру охлаждающей среды принимается средняя арифметическая температур подводимого воздуха, измеренных термометром у входа воздуха в трансформатор через равные промежутки в течение последней четверти времени испытания.

Примечание. Относительно измерения температуры охлаждающей среды при испытании мощных трансформаторов — см. примечание к пункту 1 настоящего параграфа.

3. В трансформаторах с водяным охлаждением за температуру охлаждающей среды принимается средняя арифметическая из температур подводимой воды, измеренных термометром у входа воды в трансформатор через равные промежутки в течение последней четверти времени испытания.

Если, однако, существует заметная разница между температурой охлаждающей воды и окружающего воздуха, то за температуру охлаждающей среды принимается некоторая условная температура, которая определяется следующим образом: изме-

ТАБЛИЦА

(к § 12).

Наибольшие наблюдаемые температуры и наибольшие превышения температуры частей трансформаторов для работы в местах, где температура охлаждающей среды не превосходит 35° С для воздуха и 25° С для воды.

№ по порядку	Класс изолирующего материала или название части трансформатора	Наибольшая наблюдаемая температура в °С	Наибольшее превышение температуры в °С	Метод измерения
1	Класс „О"	80	45	По методу сопротивления
2	„ „А":			
	а) обмотки, не погруженные в масло	95	60	
	б) обмотки, погруженные в масло	105	70	
3	Класс „В"	115	80	
4	„ „С"	Ограничены таким нагревом, при котором температура соседних изолированных частей, а также превышение температуры не превосходят допускаемого для них предела		
5	Постоянно замкнутые накоротко обмотки:			
	а) изолированные	Как в пп. 1—3		По методу термометра (см. § 9)
	б) неизолированные	„ „ п. 4		
6	Железный сердечник:			
	а) соприкасающийся с обмотками	„ „ пп. 1—3		
	б) не соприкасающийся с обмотками и не погруженный в масло	95	80	
	в) погруженный в масло	10	75	
7	Масло	95	60	

Примечания к таблице.

1. Нормы наибольших превышений температуры относятся ко всем новым трансформаторам, независимо от рода охлаждения.

2. В масляных трансформаторах с водяным охлаждением, только что построенных, наблюдаемые температуры должны быть на 10° С ниже тех наибольших наблюдаемых температур, которые приведены в таблице, так как во время работы условия охлаждения трансформатора водою неизбежно ухудшаются и температура нагрева растет.

*

ряют сопротивление обмотки испытуемого трансформатора перед началом испытания при температуре окружающего воздуха; затем, не включая трансформатора в сеть, ставят его в нормальные условия охлаждения водой и по изменению сопротивления судят об изменении температуры обмотки. Установившаяся при этом температура обмотки принимается за температуру охлаждающей среды.

Примечание. За температуру охлаждающей среды можно принимать температуру воды лишь в том случае, когда разность температур охлаждающей воды и окружающего воздуха не превышает 5° С.

§ 15.

При измерении температуры по методу термометра последний приводится в возможно тесное соприкосновение с данной частью трансформатора в той его точке, которая предполагается наиболее нагретой. При этом шарик термометра должен быть изолирован от окружающей среды каким-нибудь трудно проводящим тепло материалом, например войлоком или ватой.

Температура масла измеряется в верхних слоях его.

§ 16.

В трансформаторах для продолжительной и повторно-кратковременной работы превышение температуры обмоток по методу сопротивления определяется по формуле:

$$T_2 - T_1 = \frac{R_{гор} - R_{хол}}{R_{хол}} (234{,}5 + T_1) - (T_{охл.\,ср} - T_1).$$

В трансформаторах для кратковременной работы превышение температуры обмоток по методу сопротивления определяется по формуле:

$$T_2 - T_1 = \frac{R_{гор} - R_{хол}}{R_{хол}} \cdot (234{,}5 + T_1).$$

В этих формулах:

T_2 — температура обмотки трансформатора в нагретом состоянии в конце испытания трансформатора на нагрев;

T_1 — температура обмотки трансформатора в холодном состоянии, т. е. перед испытанием трансформатора на нагрев;

$T_{охл.\,ср}$ — наблюдаемая температура охлаждающей среды, измеряемая согласно § 14.

$R_{гор}$ — сопротивление обмотки трансформаторов в нагретом состоянии при температуре T_2;

$R_{хол}$ — сопротивление обмотки трансформатора в холодном состоянии при температуре T_1.

§ 17.

1. Измерение температуры производится немедленно вслед за выключением трансформатора, причем одновременно с этим следует останавливать приток охлаждающего воздуха или воды.

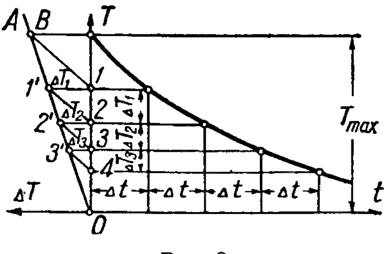


Рис. 2.

Примечание. Если возможно, то измерение температуры производится без отключения трансформатора от сети.

2. В том случае, когда между моментом выключения и моментом измерения температуры трансформатора может пройти промежуток времени, достаточный для того, чтобы температура трансформатора могла несколько понизиться, следует определять температуру частей трансформатора в момент выключения.

Примечание. В тех случаях, когда непосредственное измерение температуры в момент выключения невозможно, определение ее может быть сделано следующим приближенным способом. После выключения трансформатора отмечают в течение некоторого времени температуры его частей и строят кривую превышения температуры в функции от времени. Величины падения температуры ΔT, соответствующие равным промежуткам времени Δt, откладывают влево от оси ординат (рис. 2) и через полученные точки $1'$, $2'$, $3'$ и т. д. проводят прямую OA. Проводя затем линию 1-B, параллельную отрезкам 2-$1'$, 3-$2'$, 4-$3'$ и т. д., получают искомое превышение температуры T_{max}, соответствующее моменту выключения трансформатора.

3. Если после выключения трансформатора из сети показания термометра возрастут, то за измеренную температуру считается наибольшая.

§ 18.

Чтобы избежать потери времени и энергии, испытание трансформатора на нагревание можно закончить после того, как превышение температуры достигает 85—90% от предполагаемого конечного превышения температуры. В этом случае конечное превышение температуры определяется графическим построением. С этой целью измеряется приращение температуры (ΔT) через равные промежутки времени (Δt) порядка 10—15 мин. и строится график зависимости приращения температуры (ΔT) за каждый промежуток в функции от превышения температуры T в начале этого промежутка. Приращение температуры ΔT откладывается по оси абсцисс, а превышение температуры T — по оси ординат (рис. 3).

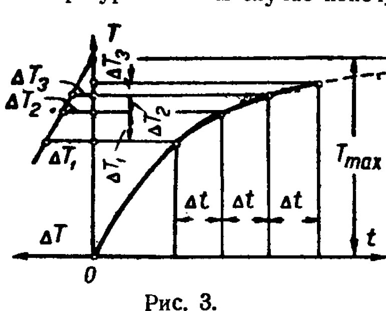


Рис. 3.

Линия, выражающая эту зависимость, представляет прямую, которая в пересечении с осью ординат дает конечное превышение температуры трансформатора.

Так как при испытании трансформаторов на нагревание метод непосредственной их нагрузки подходящими приемниками электрической энергии может иметь ограниченное применение, в особенности в случае мощных трансформаторов, то испытание трансформаторов на нагревание может производиться методом возвратной работы или одним из методов искусственной нагрузки, при котором получаемый режим работы трансформатора в тепловом отношении приближается к номинальному режиму.

VI. Испытание электрической прочности изоляции трансформаторов.

§ 19.

1. Испытания электрической прочности изоляции производятся только над новыми, вполне собранными трансформаторами, на месте их изготовления. Испытания на месте установки оговариваются особо техническими условиями заказа.

2. Испытание электрической прочности изоляции должно производиться с трансформатором в нагретом состоянии; при невозможности производить испытание в нагретом состоянии оно может быть произведено в холодном состоянии трансформатора.

3. Испытания электрической прочности изоляции трансформатора в нагретом состоянии производятся при температуре, соответствующей номинальному режиму работы трансформатора, и при испытательных напряжениях, указанных в § 20.

4. Испытания электрической прочности изоляции сухих трансформаторов в холодном состоянии производятся при напряжениях, превышающих на 15% испытательные напряжения, указанные в § 20.

5. Испытанию электрической прочности изоляции подвергается каждая обмотка по отношению к другим обмоткам, не соединенным с ней при работе электрически, и по отношению к заземленным металлическим частям трансформатора.

Примечание. Многофазные обмотки, соединенные между собой электрически, считаются за одну обмотку.

6. При испытании один полюс источника тока присоединяется к испытуемой обмотке, а другой — к остальным обмоткам, электрически соединенными между собой, а также с сердечником и заземленным корпусом.

7. Если обмотка трансформатора нормально соединена с сердечником и заземленным корпусом, то испытание электрической прочности ее изоляции производится по техническим условиям, предусмотренным договором.

8. Частота испытательного напряжения должна быть равна или номинальной частоте трансформатора, или 50 Hz.

9. Форма кривой испытательного напряжения должна быть практически синусоидальной (см. § 2, п. 3 настоящих „Норм").

10. Испытание должно начинаться при напряжении, меньшем $^1/_3$ испытательного напряжения. Напряжение затем должно повышаться постепенно до испытательного напряжения, однако с такой быстротой, какая допускает возможность правильного отсчета показаний измерительных приборов. Испытательное напряжение должно выдерживаться трансформатором в течение 60 секунд.

11. Измерение сопротивления изоляции трансформаторов не считается обязательным.

12. При производстве испытаний изоляции трансформаторов должны быть приняты меры предосторожности, указанные в п. 1 приложения II к нормам на фарфоровые изоляторы.

13. Результаты испытания изоляции повышенным напряжением считаются удовлетворительными, если во время испытания не происходит ни пробивания, ни перекрытий, ни скользящих разрядов и если путем наблюдения за потреблением тока будет установлено, что испытательное напряжение не повредило изоляции.

Явление короны во время испытания не должно рассматриваться как несоответствие электрической прочности нормам.

А. Испытательное напряжение трансформаторов.

§ 20.

I. Трансформаторы, кроме поименованных в пп. II и III.	Двойное номинальное напряжение плюс 1000 V.
II. Распределительные трансформаторы с первичным напряжением выше 550 V, вторичные обмотки которых непосредственно присоединены к распределительным сетям (т. е. вторичные напряжения меньше 550 V).	Первичные обмотки: двойное номинальное напряжение плюс 1000 V, но не менее 10 000 V (по соображениям безопасности для жизни). Вторичные обмотки: двойное номинальное напряжение плюс 1000 V.
III. Пусковые автотрансформаторы и реактивные катушки.	Двойное номинальное напряжение машины или аппарата, обслуживаемых автотрансформатором или катушкой плюс 1000 V.

Примечание. Для трансформаторов тока, включаемых в цепь последовательно, или добавочных трансформаторов испытательное напряжение определяется по номинальному напряжению цепи, в которую включается обмотка.

Б. Испытание изоляторов, предназначенных для трансформаторов.

§ 21.

1. Вводные, выводные и опорные изоляторы трансформаторов до 3 kV должны выдерживать испытательные напряжения, равные восьмикратному номинальному напряжению плюс 2000 V; изоляторы трансформаторов для напряжения 3 kV и выше испытываются согласно техническим условиям на фарфоровые изоляторы для высоких напряжений.

2. Испытания изоляторов производятся до постановки их на трансформаторы. При приемке трансформаторов должны быть предъявлены протоколы заводских испытаний поставляемых изоляторов. По желанию приемщика должно быть произведено контрольное испытание над однотипными изоляторами.

В. Способы измерения испытательного напряжения.

§ 22.

Испытательное напряжение может измеряться:
1) по способу вольтметра;
2) по способу искрового разрядника.
В последнем случае искровые разрядники могут быть:
а) игольчатые;
б) шаровые.

Г. Измерение испытательного напряжения по способу вольтметра.

§ 23.

1. Если испытательное напряжение измеряется при помощи вольтметра, то последний включается на стороне высокого напряжения испытательного трансформатора или непосредственно, или через трансформатор напряжения.

2. Измерение испытательного напряжения посредством умножения показаний вольтметра, включенного на стороне низкого напряжения испытательного трансформатора, на коэфициент трансформации последнего возможно только в том случае, если зарядный ток испытуемого трансформатора не изменяет заметным образом коэфициент трансформации испытательного трансформатора или если вольтметр в каждом отдельном случае специально проградуирован по разряднику.

3. В тех случаях, когда емкость испытуемого трансформатора может вызвать заметные изменения формы кривой испытательного напряжения, последнее измеряется при помощи амплитудного (максимального) вольтметра; если этот вольтметр градуирован на вольты, соответствующие амплитуде кривой напряжения, то его показания приводятся к действующему значению соответствующей синусоиды делением на $\sqrt{2}$

Д. Измерение испытательного напряжения посредством разрядника.

§ 24.

Испытание производится согласно указаниям, приводимым в приложении к настоящим „Нормам".

Е. Испытание изоляции витков.

§ 25.

1. Испытание изоляции витков производится при напряжении, повышенном относительно номинального по возможности на 100%, но не меньше, чем на 30%. Повышение напряжения может быть получено соответствующим увеличением частоты. Продолжительность испытания равна 5 мин.

Примечание. Этому испытанию не подлежат реактивные катушки.

2. Означенное в п. 1 испытание производится после испытания изоляции повышенным напряжением.

3. Для контроля результатов испытания изоляции перед испытанием изоляции повышенным напряжением и после испытания изоляции витков должно быть произведено измерение сопротивления обмоток.

VII. Выносливость трансформаторов при внезапных коротких замыканиях.

§ 26.

Трансформатор должен выдерживать в нормальных условиях эксплоатации без повреждений и остаточных деформаций внезапные короткие замыкания.

VIII. Коэфициент полезного действия трансформаторов.

§ 27.

1. Коэфициент полезного действия трансформатора определяется отношением произведения номинальной мощности на коэфициент мощности к сумме этого произведения и потерь при холостом ходе и коротком замыкании.

2. При отсутствии в технических условиях специальных оговорок к. п. д. трансформатора определяется для коэфициента мощности, равного единице.

3. Коэфициент полезного действия трансформатора для всех нагрузок приводится к условной температуре обмоток в 75° С.

4. Приложенное напряжение предполагается симметричным и синусоидальным по форме.

5. Коэфициент полезного действия трансформатора определяется только косвенным способом, т. е. при помощи измерения его потерь.

Примечание. Определение к. п. д. трансформатора прямым методом, по способу непосредственного измерения получаемой и отдаваемой мощности нецелесообразно.

§ 28.

1. Потери в трансформаторе состоят из потерь, определяемых опытом холостого хода, и потерь, определяемых опытом короткого замыкания.

2. Потери холостого хода должны измеряться при разомкнутой одной обмотке, при номинальной частоте и при номинальном напряжении другой обмотки.

Примечание. Измерение потерь холостого хода производится обычно со стороны низшего напряжения.

3. Потери короткого замыкания измеряются при замкнутой накоротко одной обмотке, номинальной частоте и при таком напряжении, приложенном к зажимам другой обмотки, при котором устанавливается номинальный ток.

4. При измерении потерь холостого хода и короткого замыкания следует пользоваться зажимами, соответствующими номинальным напряжениям.

IX. Изменение напряжения трансформатора.

§ 29.

1. Изменением напряжения трансформатора V при заданном коэфициенте мощности называется разность между номинальным вторичным напряжением и напряжением, устанавливающимся на вторичной обмотке, при номинальной вторичной силе тока, номинальной частоте и номинальном первичном напряжении.

2. Изменение напряжения трансформатора определяется в процентном отношении к номинальному вторичному напряжению.

3. При отсутствии в технических условиях специальных оговорок предполагается, что изменение напряжения относится к коэфициенту мощности вторичной цепи $\cos\varphi_2$, равному единице.

4. Изменение напряжения трансформатора приводится к условной температуре в 75° С.

5. Приложенное напряжение предполагается симметричным и синусоидальным по форме.

§ 30.

1. Изменение напряжения трансформатора может определяться двумя способами:
а) непосредственным измерением;
б) опытом короткого замыкания.

2. Для определения изменения напряжения по способу непосредственного измерения трансформатор должен быть нагружен до номинальной силы тока при коэфициенте мощности, равном единице, или же при обусловленном коэфициенте мощности, и при этом должно быть измерено напряжение на зажимах вторичной обмотки; первичное напряжение при опыте должно быть близко к номинальному.

3. Для определения изменения напряжения по опыту короткого замыкания напряжение, приложенное к одной из обмоток, должно иметь такую величину, при которой в другой обмотке устанавливается номинальная сила тока. Это напряжение называется номинальным напряжением короткого замыкания. Измеренное значение напряжения короткого замыкания приводится к температуре в 75° С и определяется в процентном отношении к соответствующему номинальному напряжению.

4. Изменение напряжения трансформатора по опыту короткого замыкания определяется для заданной нагрузки и заданного коэфициента мощности по следующей формуле:

$$\Delta V\% = e_r \cos\varphi_2 + e_s \sin\varphi_2 + \frac{(e_s \cos\varphi_2 - e_r \sin\varphi_2)^2}{200}.$$

В приведенной формуле:
e_r — активная составляющая напряжения короткого замыкания в процентах;
e_s — реактивная составляющая напряжения короткого замыкания в процентах.

X. Обозначения зажимов и ответвлений трансформаторов.

§ 31.

1. Выводы трехфазного трансформатора обозначаются на стороне высшего напряжения буквами A, B и C, а соответствующие им выводы низщего напряжения буквами a, b и c.

2. Выводы соединенных вместе концов обмоток фаз обозначаются соответственно O и o.

3. В случае, если обмотки фаз разделены на несколько отдельных частей, то начала и концы этих частей в местах разрыва обозначаются теми же буквами, но со значками ('), ('') и т. д. по числу разрывов обмотки. Например: A', B', C', X', Y', Z'; A'', B'', C'' и т. д.

4. Ответвления обозначаются цифровыми индексами *1*, *2*, *3* и т. д. при соответствующих буквах, начала же и концы фаз всегда обозначаются буквами без индексов (см. рис. 4 и 5).

5. Выводы и ответвления обмоток однофазных трансформаторов имеют такие же обозначения, как фаза A трехфазного трансформатора (см. рис. 6 и 7).

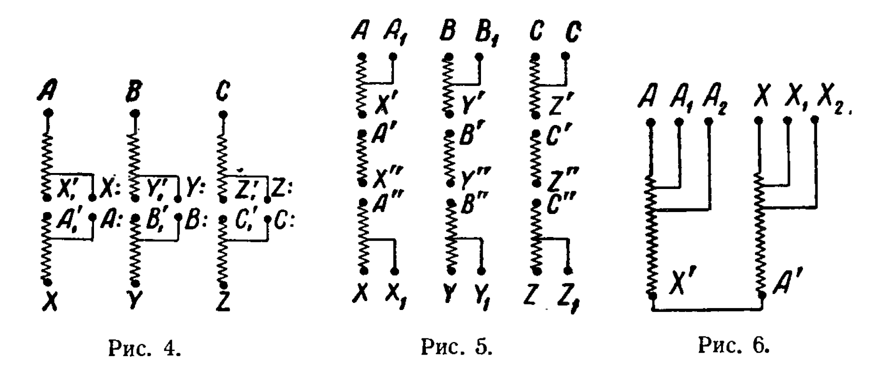


Рис. 4. Рис. 5. Рис. 6.

6. Выводы и ответвления, соответствующие номинальным напряжениям, отмечаются подчеркиванием соответствующих букв.

7. Расположение выводов трехфазных трансформаторов с тремя выводами на высоком напряжении и четырьмя выводами на низком напряжении должно выполняться всегда по следующей схеме (рис. 8).

8. Общеупотребительные способы соединения обмоток трехфазных трансформаторов делятся на четыре группы, приведенные в таблице на стр. 250; из них в качестве нормальных рекомендуются:

Y/Y — 12, Δ/Y — 11, Y/Δ — 11 и Y/Z — 11.

Примечание 1. Нормальный порядок следования векторов должен быть такой: вектор напряжения фазы B отстает на 120°, а вектор напряжения фазы C на 240° от вектора напряжения фазы A.

Примечание 2. Условные обозначения групп соединений обмоток числами 12, 6, 5, 11, указанные в таблице, основаны на следующем. Угловое смещение векторов напряжения — 0°, 180°, 150°, 330° для различных групп соединений представляются углами между стрелками часового циферблата в моменты, соответствующие 12, 6, 5 и 11 часам.

Рис. 7.

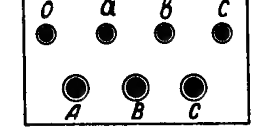


Рис. 8

Примечание 3. Соединение обмоток в звезду обозначается буквой Y, соединение обмоток в треугольник — буквой Δ, соединение обмоток в зигзаг — буквой Z. Над чертой помещается буква, обозначающая соединение обмоток высшего напряжения, под чертой — низшего напряжения.

Примечание 4. Буквенные обозначения в схемах соединений указаны в том порядке, в каком они представляются наблюдателю, стоящему перед трансформатором со стороны соответствующего напряжения.

Примечание 5. Указанные в таблице схемы соединений обмоток соответствуют такому их выполнению, при котором, исходя от зажимов, отмеченных одинаковыми буквами, получают одно и то же направление обмоток.

Таблица групповых соединений обмоток трансформаторов.

Обозначения групп соединений		Угловое смещение	Диаграммы векторов		Схема соединений	
			Высшее напряжение	Низшее напряжение	Высшее напряжение	Низшее напряжение
			Однофазные трансформаторы			
12 / 6		0° / 180°				
			Трехфазные трансформаторы			
12	Δ/Δ — 12	0°				
	Y/Y — 12 нормальн.					
	Δ Z — 12					
6	Δ/Δ — 6	180°				
	Y/Y — 6					
	Δ/Z — 6					
5	Δ/Z — 5	150°				
	Y/Δ — 5					
	Y/Z — 5					
11	Δ/Y — 11 нормальн.	330°				
	Y/Δ — 11 нормальн.					
	Y/Z — 11 нормальн.					

XI. Условия параллельного включения трансформаторов.

§ 32.

1. Трансформаторы, предназначенные для параллельной работы, должны иметь одинаковые первичные и вторичные номинальные напряжения и одинаковые напряжения короткого замыкания.

Примечание 1. Номинальные напряжения короткого замыкания считаются одинаковыми, если они отличаются от их среднего значения не более, чем на ± 10%.

Примечание 2. Следует избегать включения на параллельную работу трансформаторов, мощности которых отличаются друг от друга больше, чем в отношении 3 : 1.

Примечание 3. Если для параллельной работы предназначаются два трансформатора различной мощности и с различными напряжениями короткого замыкания, удовлетворяющие примечаниям 1 и 2, то следует стремиться к тому, чтобы меньший трансформатор имел большее напряжение короткого замыкания.

2. Если соблюдены правила обозначения выводов, приведенные в § 31, то для параллельного соединения однофазных трансформаторов одной и той же группы необходимо соединить выводы, обозначенные одинаковыми буквами. Параллельное соединение трехфазных трасформаторов возможно:

а) между трансформаторами одной и той же группы при соединении одноименных зажимов;

б) между трансформаторами групп 12 и 6 при соответствующем изменении внутренних соединений обмоток высшего или низшего напряжения (т. е. при перемене начала и конца в каждой фазе);

в) между трансформаторами групп 5 и 11 при изменении внутреннего соединения (см. п. „б") или при одном из следующих соединений зажимов:

Группа соединений	Высшее напряжение	Низшее напряжение
5 / 11	A B C	a b c
	A C B	c b a
	C B A	b a c
	B A C	a c b

XII. Щиток трансформатора.

§ 33.

1. Каждый трасформатор должен иметь щиток с данными, проставленными на нем согласно пп. 2 и 3.

Щиток должен быть прикреплен на стороне низшего напряжения таким образом, чтобы данные на нем можно было читать во время работы трансформатора.

2. Щиток должен содержать следующие сведения:

а) наименование треста (фирмы) и завода;

б) заводский тип трасформатора и заводский номер и

в) технические данные согласно п. 3.

3. В зависимости от типа трансформатора на щитке должны находиться следующие данные (см. таблицу на стр. 252):

Примечание 1. Если трансформатор предназначается для работы при нескольких различных режимах работы, то соответствующие им данные мощности, напряжений, токов и т. д. должны быть проставлены на одном или нескольких отдельных щитках.

Примечание 2. Если трансформатор имеет два или три ответвление, то на щитке помещаются все напряжения; если же число ответвлений больше трех, то на щитке помещаются только номинальное напряжение и напряжения, соответствующие двум крайним ответвлениям.

Примечание 3. В трансформаторах с независимым воздушным охлаждением на щитках указываются:

а) необходимое количество воздуха при номинальном режиме в кубических метрах в минуту;

№ по пор.	Трансформатор	Автотрансформатор	Трансформатор-регулятор напряжения	Реактивная катушка
1	Номинальная мощность	Номинальная мощность	Номинальная мощность	Номинальная мощность
2	Частота	Частота	Частота	Частота
3	Число фаз	Число фаз	Число фаз	Число фаз
4	Номинальное высшее напряжение	Номинальное высшее напряжение	Номинальное высшее напряжение	Номинальное падение напряжения
5	—	—	Напряжение сети	Напряжение сети
6	Номинальное низшее напряжение	Номинальное низшее напряжение	Пределы регулирования напряжения	—
7	Номинальная сила тока обмотки высшего напряжения	Номинальная сила тока обмотки высшего напряжения	Номинальная сила тока обмотки высшего напряжения	Номинальная сила тока
8	Номинальная сила тока обмотки низшего напряжения	Номинальная сила тока обмотки низшего напряжения	Номинальная сила тока обмотки низшего напряжения	—
9	Группа и способ соединения фазных обмоток	Группа и способ соединения фазных обмоток	Способ соединения фазных обмоток	Способ соединения фазных обмоток
10	Режим работы	Режим работы	Режим работы	Режим работы
11	Номинальное напряжение короткого замыкания	Номинальное напряжение короткого замыкания	Номинальное напряжение короткого замыкания	—
12	Способ охлаждения	Способ охлаждения	Способ охлаждения	Способ охлаждения

б) необходимое давление в миллиметрах водяного столба.

Примечание 4. В трансформаторах с водяным охлаждением на щитках указываются:

а) необходимое количество воды при номинальном режиме в литрах в минуту и

б) наибольшая допустимая температура вводимой в трансформатор воды, если таковая превышает 25° С.

Примечание 5. В трансформаторах с циркуляцией масла на щитке указывается количество циркулирующего масла в литрах в минуту в целях определения мощности насоса.

XIII. Допуски.

§ 34.

Допуск есть наибольшее допустимое отклонение значений той или другой величины от ее значения, определяемого данными нормами или техническими условиями.

Допуски учитывают неизбежную неоднородность материалов, неточности производства и ошибки измерений.

№ по пор.	Величина		Допуски в %
1.	Потери холостого хода	± 10%	от устанавливаемой техническими условиями величины
2.	Напряжение короткого замыкания	± 10%	
3.	Коэфициент полезного действия	10%	от потерь, определяемых техническими условиями
4.	Повышение температуры		никакого сверх нормы

ОГЛАВЛЕНИЕ.

Редактор *Е. Г. Комар.* Техн. редактор *Лебедев.*

Книга сдана в набор 2/III 1934 г. Подписана к печати 22/VII 1934 г.
Индекс ЭЭ-25-5-2. Энергоиздат № 28/л. Ленгорлит № 153 4.
Тираж 10000 экз. Заказ № 1676. Формат бумаги $62 \times 94^{1}/_{10}$ см.
Печатн. л. 16. Бум. л. 8. Авт. л. $21^{1}/_{2}$. (127000 тип. зн. в 1 бум. л.).
ТКК № 95 от 20/VI-34 г.

2-я типография „Печатный Двор“, треста „Полиграфкнига, Ленинград. Гатчинская 26.